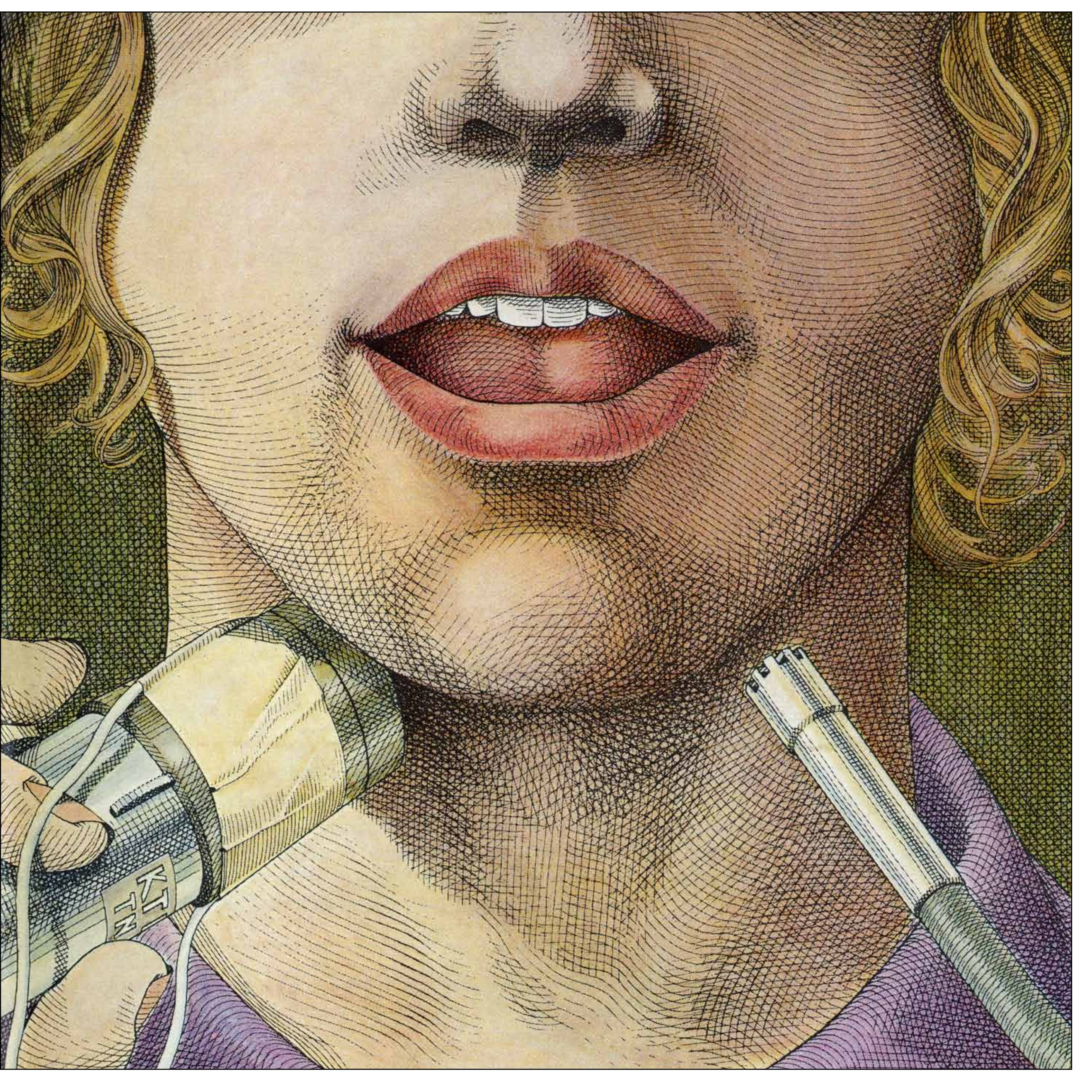
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



LA ACUSTICA DEL CANTO

Mayo 1977

140 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 8
Mayo 1977

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15
ESPAÑA

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Claudio Mans: *Superphénix: un reactor reproductor a escala industrial;* Manuel Puigcerver: *Ondas en el viento solar;* Monique Robert: *Los receptores de los opiáceos y substancias opiáceas endógenas;* Francisco Gil y Juana Iriarte: *Fijación biológica de nitrógeno;* Andrés Levin Richter: *La acústica del canto;* Miquel Gich: *Las rocas más antiguas y la acreción de los continentes;* Pere Arté: *Peces luminosos destellantes;* Gerardo Espinosa: *Ciencia y sociedad;* Andrés Muñoz Machado: *Taller y laboratorio;* Luis Bou García: *Juegos matemáticos.*

Libros:

Juan R. Ribera y
Emilio López-Oliva



LA PORTADA

La ilustración de la portada refleja un experimento que demuestra la tendencia de una soprano a abrir más la boca conforme se va elevando el tono en que canta. Obra así para aumentar la frecuencia del primer "formante" –una determinada resonancia del tracto vocal– de manera que se equipare a la frecuencia fundamental del tono en que está cantando (véase "La acústica del canto", por Johan Sundberg, en éste número). La cantante sujeta un vibrador (*a la izquierda*) apretándolo contra el cuello; cerca de sus labios hay un pequeño micrófono (*a la derecha*). Comienza por cantar el sonido de una vocal a un tono determinado y luego deja de cantar, pero mantiene la posición de sus labios, de su lengua y de los demás órganos articuladores que determinan el sonido de la vocal. El vibrador proporciona al tracto vocal de la cantante un sonido grave que está condicionado por los articuladores, como lo estaría también la propia voz de la cantante, pero cuyas frecuencias formantes se analizan con mayor facilidad de lo que se podrían analizar las de un tono elevado.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1.540 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números); 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
160 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
225 pesetas.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada de Laszlo Kubinyi

Página	Fuente
5-9	George V. Kelvin
10	Georges A. Vendryes
11-13	Lorelle M. Raboni
17-23	Ilil Arbel
27	Carol Donner
28-32	Allen Beechel
33	Carol Donner
34-40	Allen Beechel
42	Jet Propulsion Laboratory
44	Bunji Tagawa
45	Martin B. Garment y Winston J. Brill
46-47	Bunji Tagawa
48	Winston J. Brill *(arriba)*, Frank B. Dazzo *(abajo)*
49	Frank B. Dazzo *(arriba)*, Bunji Tagawa *(abajo)*
50-53	Bunji Tagawa
57	Laszlo Kubinyi
58	Gabor Kiss
59	Laszlo Kubinyi
60	Laszlo Kubinyi y Gabor Kiss
61	Gabor Kiss
62	Johan Sundberg *(arriba)*, Gabor Kiss *(abajo)*
63	Laszlo Kubinyi y Gabor Kiss
67	Stephen Moorbath
68-79	Andrew Tomko
83	Tom Prentiss
84	David C. Powell *(arriba)*, Ken Lucas *(centro y abajo)*
85	James G. Morin
86	David C. Powell
87	Michael D. Lagios
88	Tom Prentiss
90-98	Francisco Sánchez
100-105	Ilil Arbel
116	INVESTIGACION Y CIENCIA

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-15
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda. Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

GEORGES A. VENDRYES ("Superphénix: un reactor reproductor a escala industrial") ha venido trabajando en los programas franceses para el desarrollo de reactores reproductores rápidos refrigerados por metal líquido, desde el inicio del programa en 1957. Ostenta el cargo de director de aplicaciones nucleares del Commissariat à l'Energie Atomique. Se graduó en la Escuela Politécnica de París; al acabar la Segunda Guerra Mundial trabajó como ingeniero civil en la reconstrucción de puentes y carreteras en el sur de Francia antes de dedicarse a la investigación científica. Entró, luego, en el Laboratoire de Synthèse Atomique bajo la dirección de Frédéric Joliot-Curie, y, en 1951, se doctoró en ciencias físicas por la Universidad de París. Desde su incorporación al equipo del Commissariat à l'Energie Atomique en 1952, colaboró en la sección de reactores de neutrones rápidos y participó activamente en la confección del programa francés de fusión nuclear controlada.

J. T. GOSLING y A. J. HUNDHAUSEN ("Ondas en el viento solar") son heliofísicos del Los Alamos Scientific Laboratory y del High Altitude Observatory de Boulder, Colorado, respectivamente. Gosling se graduó en física en la Universidad de Ohio, en 1960, doctorándose en 1965 por la Universidad de Berkeley, California. Inmediatamente después se trasladó a Los Alamos, en donde residió a lo largo de un bienio realizando investigaciones postdoctorales sobre el viento solar. En 1967 entró a formar parte del grupo científico del High Altitude Observatory, continuando su trabajo sobre el viento solar y la física de la corona solar. En 1975 regresó a Los Alamos. Hundhausen fue miembro del grupo de la sección teórica del Los Alamos Scientific Laboratory, de 1964 a 1971. Recibió su formación de primero y segundo ciclo en la Universidad de Wisconsin, doctorándose en física en 1965. Desde 1971 ha sido miembro del grupo científico director del High Altitude Observatory y, al mismo tiempo, ha profesado cursos en la Universidad de Colorado. En su investigación se ha venido ocupando de procesos físicos en plasmas tenues, en especial, de las observaciones y los modelos teóricos del plasma interplanetario y su interacción con el campo geomagnético.

SOLOMON H. SNYDER ("Los receptores de los opiáceos y las substancias opiáceas endógenas") es profesor de farmacología y de terapéutica experimental en la Johns Hopkins University School of Medicine, en cuyo centro enseña también psiquiatría. Consiguió el título de doctorado por la Georgetown University School of Medicine. Tras su período de interno en el Kaiser Foundation Hospital de San Francisco, pasó como investigador al National Institute of Mental Health. En 1965, obtuvo un puesto de residente-adjunto en el departamento de psiquiatría del Johns Hopkins Hospital, y el año siguiente se incorporó al claustro docente de la School of Medicine.

WINSTON J. BRILL ("Fijación biológica de nitrógeno") es catedrático de bacteriología en la Universidad de Wisconsin, en Madison. Este londinense emigrado a los Estados Unidos, se graduó en biología por la Universidad de Rutgers, en 1961, doctorándose en microbiología por la de Illinois en Urbana-Champaign. Durante el bienio 1965-1967 trabajó en el departamento de biología del Instituto de Tecnología de Massachusetts, investigando la genética y regulación de la degradación de aminoácidos en las bacterias. En 1967 pasó al departamento de bacteriología de la Universidad de Wisconsin, de cuyo claustro es miembro desde 1974. "Los estudiantes y postgraduados que trabajan en mi laboratorio proceden de distintas disciplinas, a saber: edafología, genética, biología molecular, química, agronomía y bacteriología. La intercomunicación estrecha entre todos hace que el ambiente sea de extraordinario interés, estando siempre a la expectativa de posibles aplicaciones de la investigación fundamental", ha escrito recientemente.

JOHAN SUNDBERG ("La acústica del canto") es investigador del Departamento de Comunicación Oral del Real Instituto de Tecnología, de Estocolmo. Estudió en la Universidad de Uppsala, doctorándose en musicología y acústica en 1966. Está en el Real Instituto de Tecnología desde 1963; desde 1965 a 1975 fue profesor de teoría de órgano en el Conservatorio de Música de Estocolmo. "Me inicié en la música al oír un concierto de órgano a los dieciseis años". A los diecisiete, se aprestaba a construir un órgano con un amigo. "Por motivos económicos, los tubos se substituyeron por botellas vacías. Un aspirador proporcionaba el aire, los fuelles estaban bajo la cama y sólo teníamos dos registros de madera que había construido yo mismo. Chirriaba, que no sonaba. La quinta versión de aquel aparato preside hoy nuestro salón, como un elefante estático". Al terminar su tesis doctoral, en 1966, se dedicó a la investigación de la acústica del canto.

STEPHEN MOORBATH ("Las rocas más antiguas y la acreción de los continentes") es miembro del Linacre College y profesor de investigación de la universidad de Oxford. Ostenta el cargo de investigador jefe del Geological Age and Isotope Research Group, del Departamento de Geología de la universidad oxoniense.

JOHN E. McCOSKER ("Peces luminosos destellantes") es superintendente del Steinhart Aquarium de la Academia de Ciencias de California y profesor adjunto de biología marina de la Universidad estatal de San Francisco. Tras graduarse en el Occidental College, en 1967, se doctoró en el Scripps Institution of Oceanography en 1973. Trabajó como investigador en el Smithsonian Tropical Research Institute de Panamá, donde estudió la fauna piscícola marina del Caribe y del Pacífico oriental y su relación con la barrera biológica del Canal de Panamá. En 1975, McCosker dirigió la "expedición celacanto" a la isla Gran Comore. Sus trabajos de investigación de campo se han realizado en Australia, Océano Indico, América Central y la costa de California.

FRANCISCO SANCHEZ y ANTONIO MUJICA ("Luz zodiacal") pertenecen al Instituto de Astrofísica de Canarias (C.S.I.C.), del cual el primero es director. Francisco Sánchez, catedrático de astrofísica de la Universidad de La Laguna, trabaja sobre luz zodiacal y medio interplanetario como línea de investigación personal. Su esfuerzo principal se ha dirigido a la creación y organización del Instituto de Astrofísica de Canarias, base del Observatorio internacional. Es miembro de las comisiones correspondientes de la Unión Astronómica Internacional, de la American Astronomical Society y otras sociedades científicas. Antonio Mujica es profesor de física en la Universidad de La Laguna y trabaja sobre modelos de nube zodiacal.

Superphénix: un reactor reproductor a escala industrial

Se ha decidido iniciar la construcción, en Francia, de una central nuclear de 1200 megavatios del tipo de reactor reproductor. El proyecto europeo conjunto será el prototipo de futuras centrales nucleares

Georges A. Vendryes

La necesidad de recurrir a la fisión nuclear para intentar hacer frente a la demanda mundial de energía pronosticada para las próximas décadas está amplia, si no universalmente, aceptada. Sin embargo, lo que no se aprecia frecuentemente es el hecho de que si la construcción de las nuevas centrales nucleares se limita a los mismos tipos básicos de reactor que se encuentran ahora en servicio, será muy breve la tregua conseguida. La mayoría de los expertos indican que las reservas mundiales de uranio, que son económicamente explotables a los precios actuales, resultan insuficientes para asegurar que los reactores nucleares de agua ligera,construidos después del año 2000, puedan disponer de combustible durante toda su vida útil. Esto significa que, a no ser que se use el uranio de un modo más eficaz que en los reactores indicados, se convertirá en un recursos energético no muy distinto del petróleo.

Sólo los reactores reproductores –centrales nucleares que producen más combustible que el que consumen– son capaces, en principio, de extraer la máxima cantidad de energía de fisión contenida en la mena de uranio, ofreciendo así a largo plazo una solución práctica al problema del suministro de uranio. Los reactores reproductores harán posible obtener unas 50 veces más energía de una cantidad dada de uranio natural que la que puede obtenerse con los reactores actuales de agua ligera. Por ello, el contenido mínimo de uranio de las menas económicamente explotables podrá rebajarse significativamente. Debido a estas dos razones (de las que la segunda es con mucho la más importante), las fuentes habituales de uranio natural podrán ampliarse bastante. El uranio constituirá una reserva de combustible prácticamente inagotable para las futuras necesidades mundiales de energía.

Comprendiendo la importancia de estas consideraciones, numerosas naciones han emprendido intensos programas de investigación cuyo fin es desarrollar un reactor reproductor antes de que la situación de los suministros de uranio llegue a ser crítica. Recientemente, un consorcio formado por las más importantes empresas europeas de suministro eléctrico, actuando a través de una compañía subsidiaria, han decidido emprender la construcción de una central nuclear del tipo de reactor reproductor, a escala industrial, en Creys-Malville, Francia. En este artículo se describirá el nuevo reactor reproductor a escala industrial, llamado Superphénix. Primeramente, sin embargo, es necesario explicar someramente qué se entiende por la palabra reproducción, que sirve para caracterizar el funcionamiento de tales plantas.

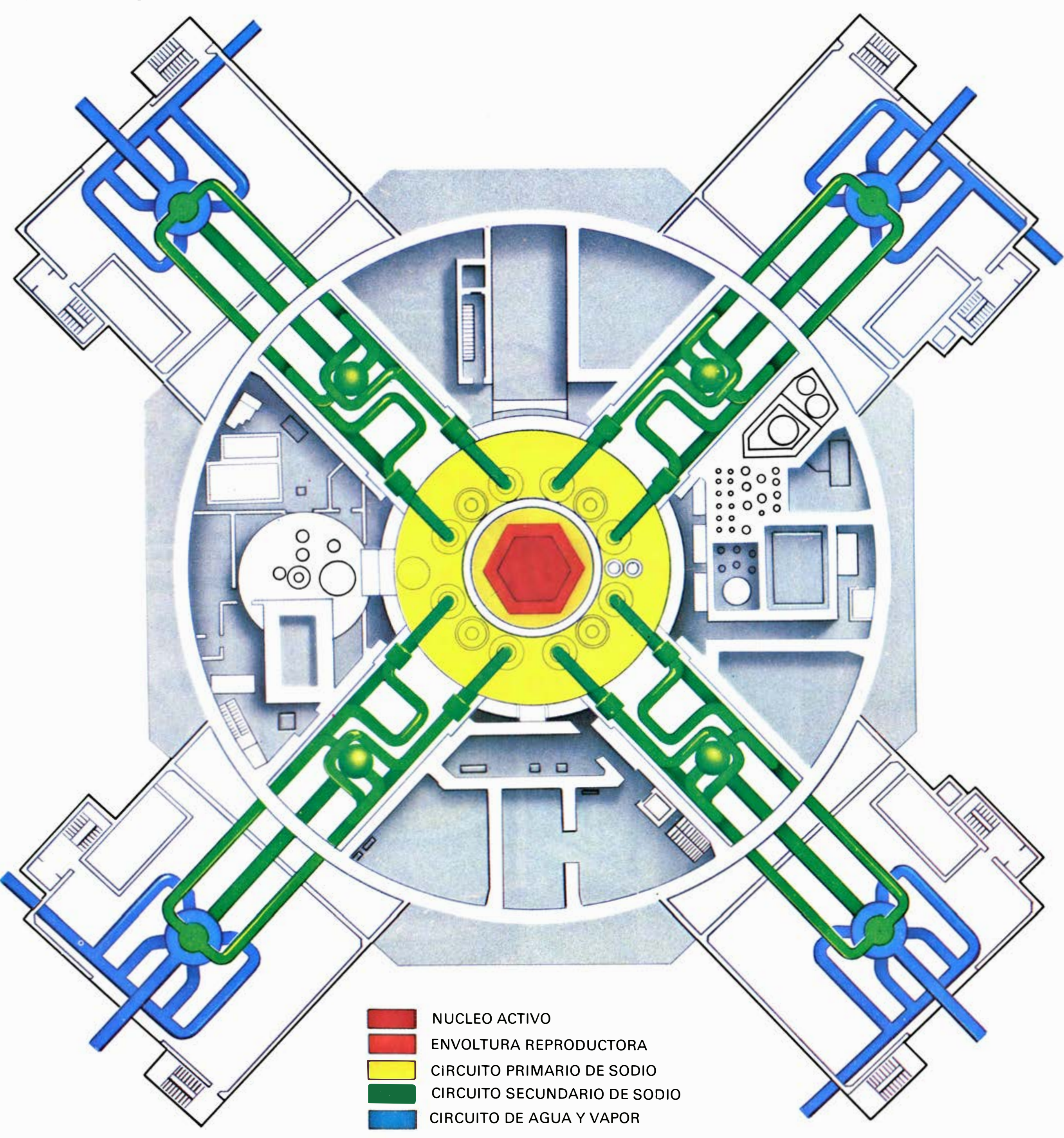
En el núcleo activo de cualquier reactor nuclear se encuentran presentes dos tipos de isótopos pesados. Un tipo, llamado isótopo fisible (o fisionable), pasa por la mayoría de las reacciones de fisión y es, al mismo tiempo, la fuente de la energía calorífica desprendida por el reactor y de los neutrones que mantienen la reacción en cadena en el núcleo. El único isótopo fisible que existe en forma natural es el uranio 235, que constituye el 0,7 por ciento del uranio natural; el isótopo uranio 238, no fisionable, constituye el 99,3 por ciento restante. Se espera que otros dos isótopos fisibles, el plutonio 239 y el uranio 233, desempeñen en el futuro un papel creciente como sustitutos del uranio 235.

El segundo tipo de isótopo pesado presente en el núcleo de cualquier reactor recibe el nombre de fértil; no sufre prácticamente reacciones de fisión, pero, por captura de un neutrón disperso, un núcleo fértil puede transformarse en un núcleo fisible al término de una serie de desintegraciones radiactivas. Un ejemplo típico de núcleo fértil es el uranio 238, que se transforma, por captura de un neutrón, en plutonio 239, fisionable. De modo similar, el torio 232 fértil, que es la única forma de torio extraída de la tierra, puede transmutarse en uranio 233 fisible.

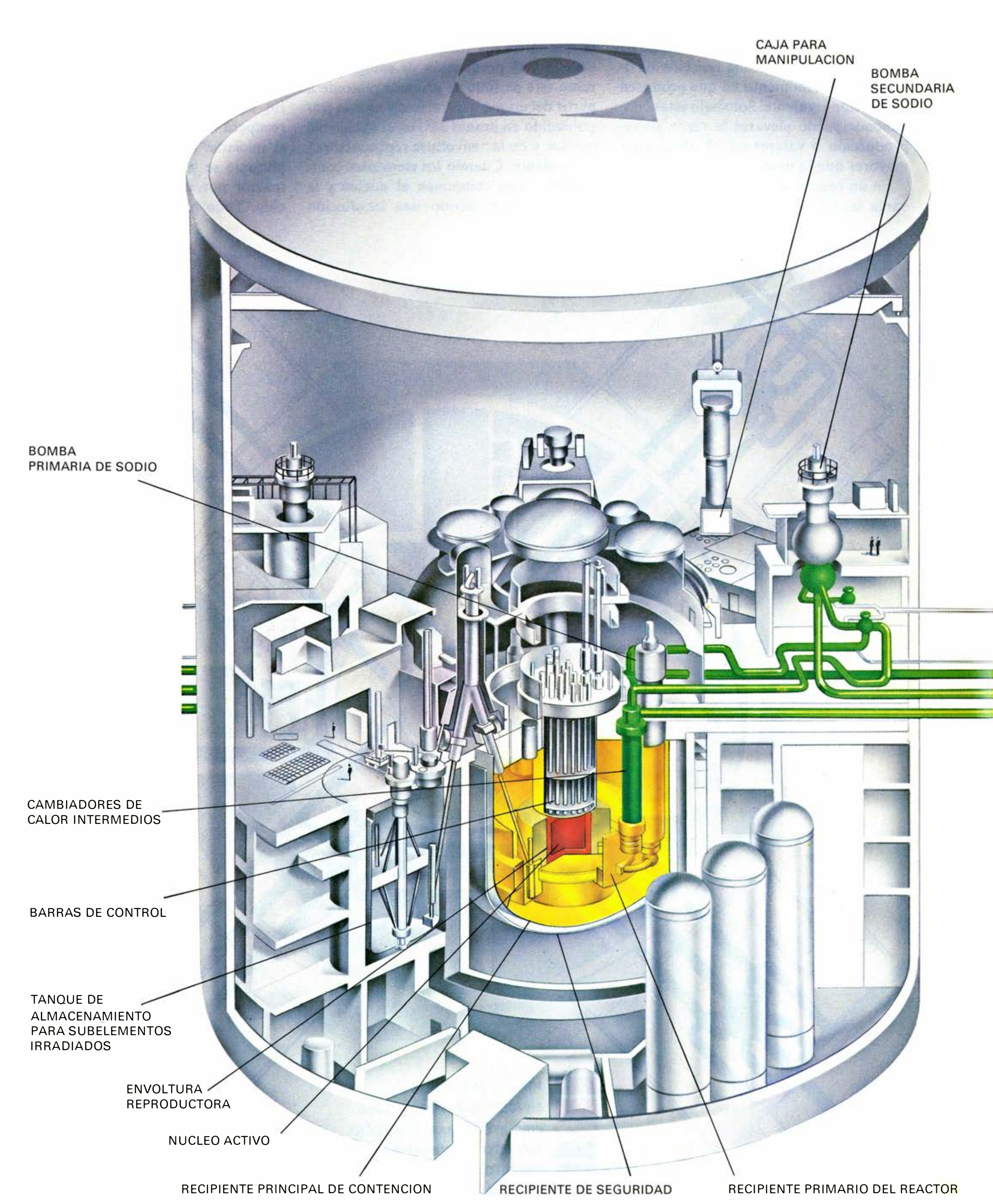
En cualquier reactor nuclear, según se van consumiendo núcleos fisibles, se van creando nuevos núcleos fisibles por transformación de núcleos fértiles. Sin embargo, la mayoría de los reactores que están actualmente en servicio usa agua ordinaria (ligera) o bien agua pesada (deuterada) para moderar o retardar el flujo de neutrones en el núcleo activo del reactor. En uno de estos reactores de neutrones lentos es imposible producir, por captura neutrónica, el mismo número de núcleos fisibles que se consume. Como resultado de ello, va decreciendo lentamente la proporción de núcleos fisibles en el combustible hasta estar por debajo de cierto nivel mínimo, momento en el que hay que desechar el combustible agotado, sin que esté transformada todavía la mayoría de los núcleos fértiles. Para que la razón de reproducción (razón entre el total de núcleos fisibles producidos a partir de material fértil y el total de material fisible consumido en el mismo período) tome valores mayores que 1, deben cumplirse una serie de condiciones especiales. Las condiciones más favorables para la reproducción se presentan cuando se usa conjuntamente plutonio 239 fisible y uranio 238 fértil en un reactor de neutrones rápidos, en el cual los neutrones producidos por las reacciones de fisión no sean frenados por una sustancia modera-

dora como el agua, desde el momento en que son emitidos por una reacción de fisión hasta el momento en que producen la reacción siguiente. Sólo bajo estas condiciones puede elevarse la razón de reproducción a valores significativamente mayores que la unidad.

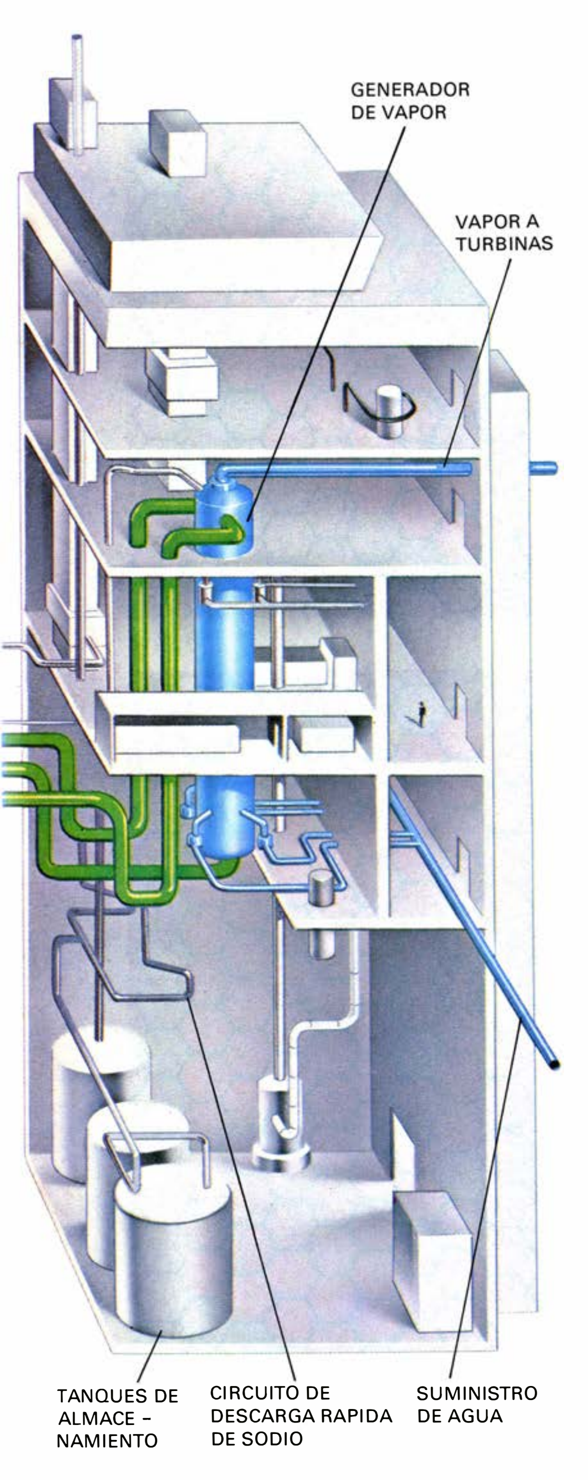
En un reactor de neutrones rápidos, la carga inicial de plutonio combustible es la que inicia las reacciones de fisión en cadena y la producción de energía. Durante este período se produce plutonio a partir del uranio natural (o del uranio empobrecido en uranio 235) en el núcleo del reactor y en la "envoltura reproductora" circundante. Cuando los elementos combustibles que componen el núcleo y la envoltura han sufrido una irradiación neutrónica prolongada, deben ser reprocesados químicamente con objeto de separar y eliminar los productos de fisión. En cada operación de reprocesado se recupera más plutonio que el que había al iniciarse la irradiación. El exceso de plutonio se separa y se reemplaza en el reactor por uranio natural o empobrecido. Todo ocurre como si en el reactor



SECCION HORIZONTAL de la proyectada central nuclear del reactor reproductor Superphénix. Muestra la disposición global de la planta, que constará básicamente de un gran edificio circular para el reactor, con cuatro edificios para los generadores de vapor, dispuestos radialmente a su alrededor. El edificio central del reactor, que está destinado a alojar todos los componentes nucleares de la planta, se construirá de hormigón armado de un metro de espesor; la edificación tendrá un diámetro interior de 64 metros y una altura de unos 80 metros. Cada edificio para generador de vapor dará servicio a un segmento del circuito secundario de sodio. (El edificio del turbogenerador correspondiente no se muestra en esta ilustración.) El emplazamiento seleccionado para el Superphénix está en Creys-Malville, en Francia. La construcción de la central ha recibido el apoyo de un consorcio de compañías europeas, con representación de Francia (51 por ciento), Italia (33 por ciento), Alemania Occidental (11,04 por ciento), Holanda (2,36 por ciento), Bélgica (2,36 por ciento) y, por último, el Reino Unido (0,24 por ciento).



SECCION VERTICAL del edificio del reactor Superphénix, y de uno de los cuatro edificios idénticos de los generadores de vapor, que muestra con un detalle algo mayor los principales componentes de la planta. El Superphénix está clasificado como un reactor reproductor de tipo recipiente, lo que significa que el núcleo activo, las bombas del circuito primario de sodio y los cambiadores de calor intermedios están todos colocados en el interior de un único recipiente muy grande. En este diseño concreto, el recipiente contenedor principal de acero, que está suspendido de una plancha superior de acero y hormigón, tiene 21 metros de diámetro y está lleno de 3300 toneladas de sodio fundido. Una estructura cilíndrica soldada al recipiente principal soporta el mecanismo de barras de control y los subelementos combustibles, que constituyen el núcleo activo del reactor. Las cuatro bombas primarias envían el sodio hacia arriba, para que circule a través del núcleo. El recipiente primario del reactor separa el sodio "frío" que entra por la base de los subelementos a temperatura de 395 grados Celsius, del sodio "caliente" que sale por el ápice a 545 grados. El sodio caliente fluye entonces a través de los ocho cambiadores de calor intermedios, que forman parte de un circuito



secundario de sodio no radiactivo, colocado por razones de seguridad entre el circuito primario de sodio y el circuito de agua y vapor. Cada uno de los cuatro circuitos secundarios consta de dos cambiadores de calor intermedios, una bomba secundaria instalada en el interior de un tanque esférico de expansión y de un generador de vapor que, según puede apreciarse, están colocados en el edificio adyacente, a la derecha.

se consumiera sólo uranio natural o empobrecido y simultáneamente se obtuviera plutonio nuevo como subproducto de la operación de la planta.

El tiempo necesario para que un reactor de reproducción produzca plutonio suficiente como para alimentar un segundo reactor idéntico al primero recibe el nombre de tiempo de duplicación del reactor. Este factor de tiempo es inversamente proporcional a la razón de reproducción del reactor. En el futuro se espera que podrán conseguirse razones de reproducción del orden de 1,4 o similares, en parte por explotación del concepto de núcleo heterogéneo *(véase ilustración de la página 8)*. Los tiempos de duplicación respectivos fluctuarán entonces entre 10 y 20 años. Como es improbable que el consumo de electricidad se duplique a intervalos más cortos al menos hasta finales de siglo, unos tiempos de duplicación de este orden permiten que los reactores de neutrones rápidos satisfagan la demanda creciente de energía por sí solos, en virtud de esta característica de autocreación de combustible.

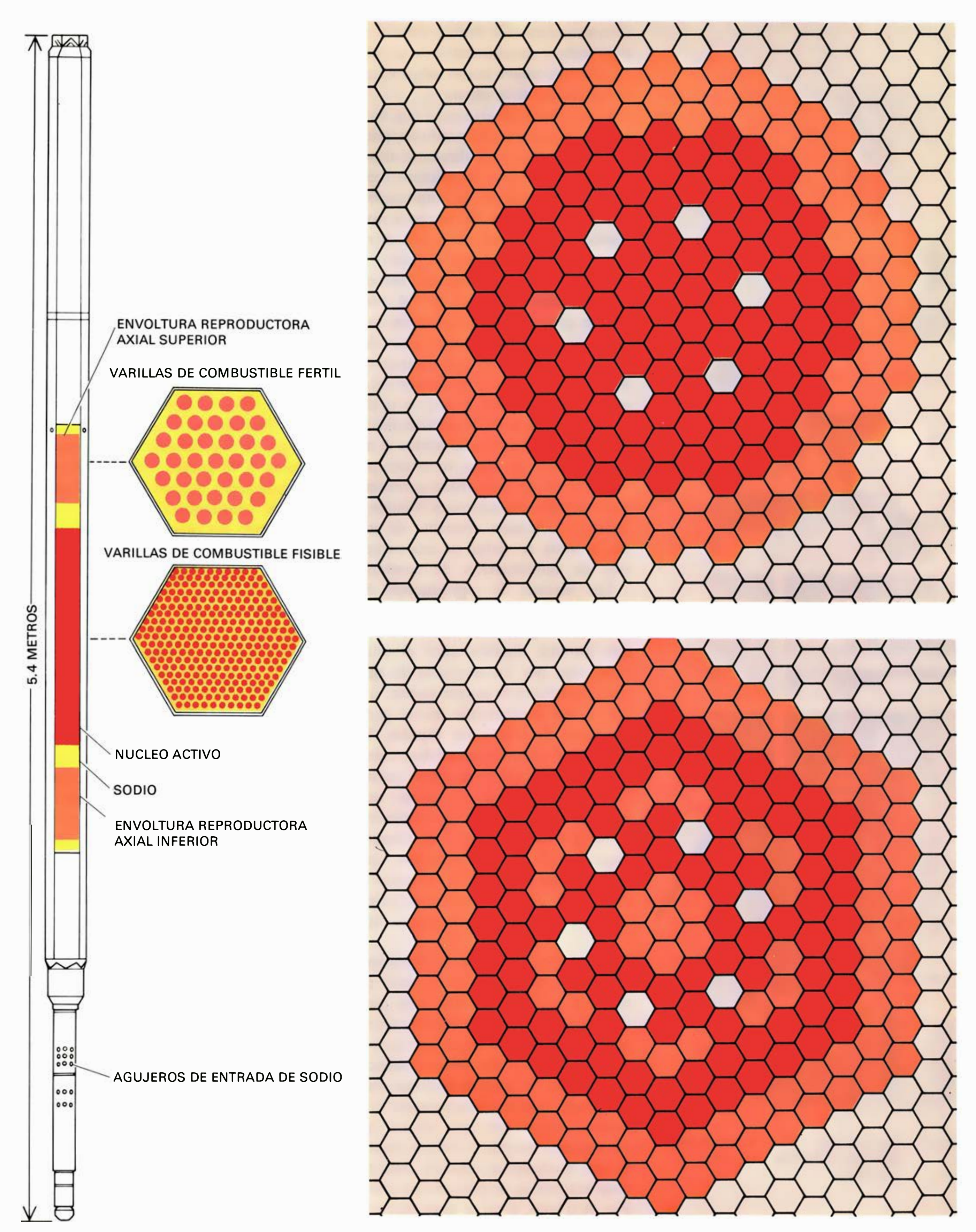
Las razones de reproducción de los reactores de neutrones rápidos construidos hasta hoy no son importantes, por lo que durante algunos años el plutonio producido por los reactores de agua ligera constituirá la mayor fuente, si no la única, del combustible inicial para los reactores de neutrones rápidos. Existe así una complementaridad destacable entre estos dos tipos de reactores nucleares. Durante un período de tiempo razonablemente largo se podrá establecer una estrategia de producción de energía nuclear basada en dos técnicas, con las centrales de agua ligera abriendo el camino para una gradual comercialización de los reactores reproductores rápidos.

Si bien las centrales de neutrones rápidos pueden producir más plutonio que el que consumen, esta posibilidad puede o no ser utilizada. Queda al criterio del usuario hacer que la producción de plutonio sea mayor o menor que el consumo. El total de plutonio disponible puede ajustarse exactamente a la demanda, según que esta última crezca, permanezca estable o incluso descienda; de este modo no se requiere crear nunca unas existencias de plutonio no utilizado. Por otro lado, si no se usan reactores de neutrones rápidos, será imposible quemar completamente el plutonio y los derivados transplutónidos producidos en las plantas de neutrones lentos. Estos elementos altamente radiactivos podrían constituir residuos que sería preciso apartar y almacenar durante miles de años.

El hecho de que las reacciones de fisión estén provocadas por neutrones rápidos en un reactor de reproducción hace que las dimensiones del núcleo sean muy compactas: el volumen del núcleo de una central de neutrones rápidos de 1000 megavatios no precisa medir más de 10 metros cúbicos. A causa de su naturaleza, los reactores de neutrones rápidos generan una gran cantidad de calor por unidad de volumen. Para eliminar esta elevada cantidad de calor del conjunto de elementos combustibles que componen el núcleo del reactor, es necesario usar un refrigerante dotado de propiedades térmicas especiales. El agua no puede usarse porque el hidrógeno es un potente moderador de neutrones, y debe evitarse cualquier materia de esa especie.

De todos los fluidos imaginables, el sodio fundido es el que presenta el conjunto de propiedades más atractivo. Líquido a 98 grados Celsius, hierve a los 882 grados a la presión atmosférica. Como la temperatura máxima del sodio en el núcleo del reactor no excede los 550 grados en un régimen normal, no es necesario presionizar los recipientes y los circuitos que lo contienen. Además, las excelentes propiedades térmicas del sodio hacen que el vapor producido en los generadores de vapor tenga características equivalentes a las requeridas para mover las turbinas de las centrales eléctricas más modernas que usan combustibles fósiles. La eficiencia global de un reactor de neutrones rápidos es del 40 por ciento o mayor, mientras que la de una típica central nuclear de agua ligera no supera el 33 por ciento; la eficiencia comparativamente grande de los reactores de neutrones rápidos es una característica positiva respecto a las descargas térmicas al medio ambiente.

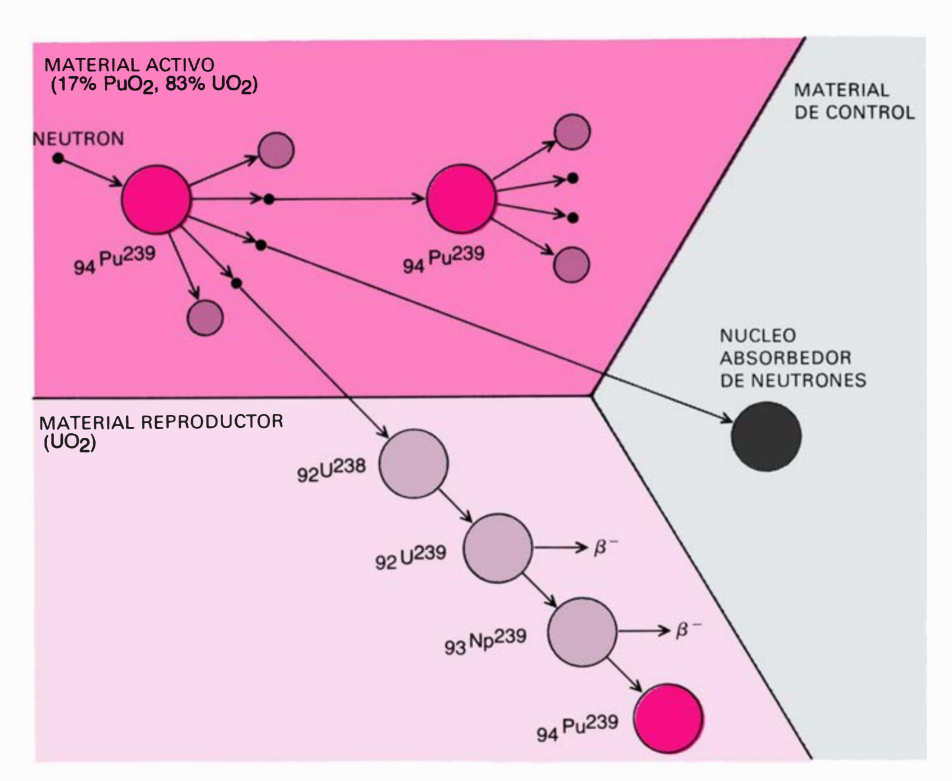
Todos los reactores de neutrones rápidos que se han construido o se están construyendo en el mundo utilizan sodio fundido como refrigerante. El hecho de que todos los países que están poniendo en práctica programa de reactores de reproducción (entre ellos, Estados Unidos, Rusia, Francia, Gran Bretaña, Alemania Federal, Benelux, Italia, Japón y la India) hayan tomado la misma decisión tecnológica básica es un factor muy favorable. Evita la dispersión de esfuerzos dirigidos hacia líneas de investigación divergentes y mejora la eficiencia global. El camino seguido ha sido aproximadamente el mismo en todos los países indicados. Los reactores construidos y planificados durante la fase de desarrollo, que hasta ahora es la predominante, han seguido una sucesión lógica que los engloba en tres categorías: reactores experimentales, plantas de demostración y centrales.



SUBELEMENTO COMBUSTIBLE NUCLEAR del reactor Superphénix, mostrado en un corte vertical a la izquierda. En cada subelemento del núcleo activo, el combustible está dividido en 271 varillas largas y delgadas, a lo largo de las cuales fluye el sodio del circuito primario *(en amarillo)*: el material fisible *(en rojo)* ocupa la parte central de la varilla, y el material fértil *(anaranjado)* está colocado a ambos extremos. (Los subelementos fértiles contienen varillas más gruesas y en menor número.) Los dos diseños alternativos que están en estudio para el núcleo de los reactores reproductores futuros se representan por las secciones horizontales esquemáticas de la derecha. Difieren entre sí en la disposición de los subelementos de acero inoxidable: en el diseño convencional del núcleo *(arriba)*, la zona central de subelementos fisibles está rodeada por una "cobertura reproductora" exterior de subelementos fértiles; en el diseño más moderno de núcleo heterogéneo *(abajo)*, el material fértil está inserto en el núcleo en forma de haces de subelementos fértiles. Los hexágonos de color gris son barras de control.

De acuerdo con esta secuencia lógica, los predecesores del Superphénix fueron el Rapsodie y el Phénix. El reactor experimental Rapsodie (el nombre combina las palabras rápido y sodio) fue encargado en 1967. Su nivel de potencia es bajo (40 megavatios de salida térmica) y no produce electricidad. Sin embargo, su comportamiento básico es representativo del régimen de reproducción desde el punto de vista de la temperatura y otros factores. El Rapsodie ha trabajado de modo satisfactorio a lo largo de casi 10 años, con una disponibilidad media de aproximadamente el 90 por ciento durante los ensayos de funcionamiento. Continúa actualmente en uso como dispositivo de ensayo para investigar los efectos de las irradiaciones prolongadas en varios elementos combustibles.

Un año después de que el Rapsodie entrara en funcionamiento, se tomó la decisión de construir la planta de demostración Phénix, llamada así a causa del pájaro mitológico que renacía de sus propias cenizas. El conseguir una elevada razón de reproducción no era especialmente importante en la fase de proyecto. El principal objetivo del Phénix era confirmar la validez y fiabilidad de funcionamiento del sistema en su conjunto, demostrando la posibilidad de construir una central de neutrones rápidos en un período de tiempo razonable y cuyo funcionamiento fuera satisfactorio. Phénix fue puesto en marcha de forma regular en julio de 1974. El historial de los dos primeros años es muy satisfactorio. Estos excelentes resultados no significan que la demostración esté ya superada. La operación cotidiana del reactor está siendo cuidadosamente observada, pues pueden ocurrir incidentes imprevistos. Durante el verano de 1976 se detectaron pequeñas fugas de sodio en dos cambiadores de calor intermedios que obligaron a la detención momentánea de la planta para reparar los defectos observados; éstos son de tipo menor y no suscitan dudas acerca del diseño global. Los resultados iniciales son lo bastante satisfactorios como para avanzar con confianza.



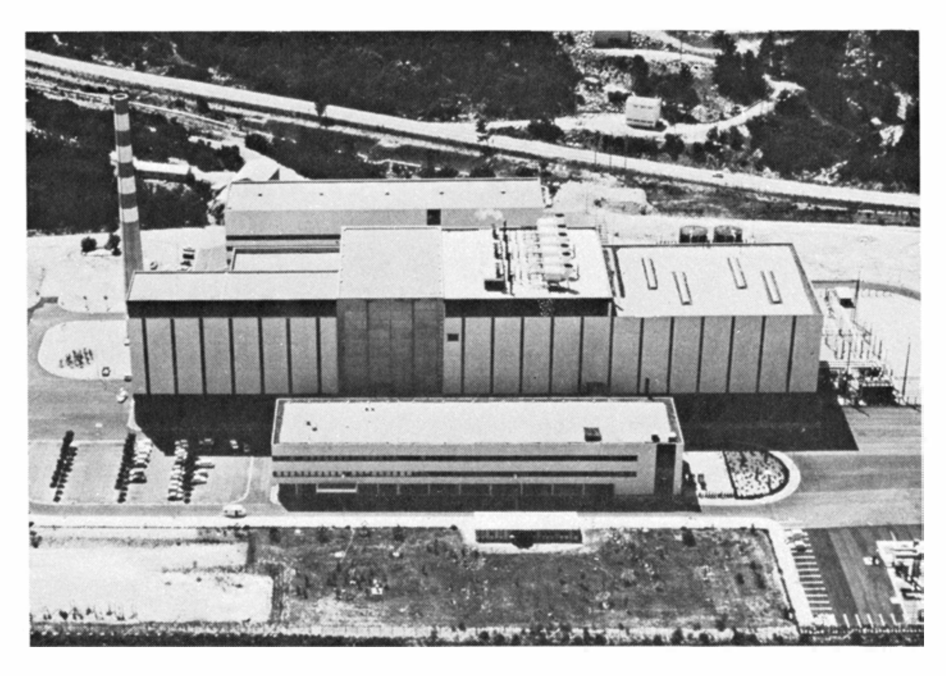
REACCIONES NUCLEARES que se efectúan en el núcleo de un reactor reproductor. Como en un reactor nuclear cualquiera, el material fisible del núcleo activo (en este caso plutonio 239) sufre una cadena automantenida de reacciones de fisión, produciendo tanto la energía térmica que suministra el reactor como neutrones que mantienen la reacción en cadena. Los núcleos fértiles reproductores del núcleo del reactor y del material de recubrimiento (en este caso uranio 238) pueden transmutarse en núcleos fisibles al capturar cada uno un neutrón disperso, con lo que se crea nuevo material fisible. La absorción de neutrones por los núcleos de las barras de control puede ajustarse para regular la velocidad de las reacciones *(a la derecha).* **En el caso típico de un reactor reproductor "rápido", los neutrones no se frenan nunca mediante ningún moderador tal como el agua.**

Superphénix, el siguiente paso en la secuencia, será el prototipo de las centrales nucleares comerciales de reproducción. Su diseño es muy similar al del Phénix. Se pensó que era absolutamente imprescindible, en cuanto al éxito y a la eficiencia global, mantener en lo posible la continuidad de las elecciones tecnológicas. A pesar de esta restricción, el progreso continuado en los conocimientos prácticos y teóricos adquiridos ha originado, en varios casos, cambios significativos respecto al Phénix, aunque sólo sea en lo que respecta a criterios de seguridad más restrictivos. Creys-Malville, en donde se construirá el Superphénix, está en la cabecera del valle del Ródano, no lejos de las redes de distribución de electricidad de Italia y Alemania. El emplazamiento elegido para la central, a orillas del Ródano y a unos 75 km al este de Lyon, es una región agrícola de población dispersa en que no está programada la construcción de otros proyectos de grandes dimensiones.

Desde el punto de vista geológico, la zona de Creys-Malville está situada en una zona de baja sismicidad de grado VI de la escala macrosísmica internacional (en esta escala de doce grados corresponde el intervalo de un grado a un factor de dos en la aceleración del suelo). La planta Superphénix está proyectada para seguir funcionando incluso después de haber sufrido un sismo de grado VI, que corresponde a la mayor intensidad observada en la región. Además, el diseño garantiza que las funciones esenciales para la seguridad de la planta, tales como la detención de la producción de neutrones, la eliminación de la energía residual del núcleo y la integridad del recinto que contiene el combustible, se mantendrán en el supuesto de un sismo con una intensidad de siete grados.

La central nuclear Superphénix estará proyectada para adaptar su producción a la demanda de la red de electricidad. Trabajará como una central de carga básica. La producción bruta de energía de la central se ha fijado en 1200 megavatios, que es similar a la potencia de las centrales nucleares de agua ligera, cuya construcción está programada para la misma fecha. En 1985, 1200 megavatios representarán entre 1,5 y 2 por ciento de la potencia total instalada en la red francesa de electricidad. La elección de esta potencia para el Superphénix representa una solución de compromiso. Por un lado, hay la tendencia a construir grandes centrales nucleares por motivos económicos; por otro lado, la extrapolación al pasar del Phénix al Superphénix debe mantenerse dentro de unos límites razonables, lógicamente.

Una central nuclear de neutrones rápidos no difiere sensiblemente en su disposición general y en su esquema de operación de otra central nuclear cualquiera. El calor producido en el núcleo del reactor se lleva por convección mediante un fluido (sodio fundido en este caso) al agua, produciendo vapor, que alimenta una turbina productora de



PHENIX es la planta de demostración del reactor reproductor de 250 megavatios, situada a orillas del Ródano, que comenzó a producir electricidad a plena potencia en julio de 1974.

energía eléctrica. Con objeto de evitar cualquier reacción accidental entre el sodio radiactivo y el agua se coloca un circuito intermedio, o secundario, de sodio no radiactivo entre el circuito primario, que conduce el sodio a través del núcleo, y el circuito de agua y vapor. En lugar de un turbogenerador de 1200 megavatios de avanzado diseño, se utilizarán dos unidades de 600 megavatios en paralelo, empleando entonces sólo equipos convencionales cuyo comportamiento ha sido comprobado suficientemente en muchas centrales térmicas de fuel-oil.

El diseño del núcleo y del conjunto de elementos combustibles es un factor clave de la realización del Superphénix. El núcleo, como centro de la producción de calor, es la parte sometida a mayores esfuerzos de entre todas las de un reactor nuclear. Esto es todavía más cierto en un núcleo de neutrones rápidos, en el que la producción de calor por unidad de volumen es excepcionalmente elevada (hasta de 500 kilovatios por litro) y todas las estructuras están sometidas a un intenso flujo de neutrones rápidos (6×10^{15} neutrones por centímetro cuadrado y por segundo). Para asegurar que el calor se elimine sin que se llegue a temperaturas excesivas, el combustible nuclear está subdividido en forma de varillas largas y delgadas (menos de un centímetro de diámetro) a lo largo de las cuales el sodio fluye a una velocidad de seis metros por segundo. El material fisionable está colocado en la parte central de la varilla y el material fértil está colocado a ambos extremos. Un haz de 271 varillas está unido mediante una estructura hexagonal de acero inoxidable conocida por subelemento combustible. Un conjunto de 364 subelementos, colocados en forma regular, constituye el núcleo activo de reactor, que está a su vez rodeado por 232 subelementos similares que contienen varillas más gruesas de material fértil, las cuales constituyen la cubierta reproductora. El sodio fluye de abajo arriba entrando por la parte inferior de los subelementos a 395 grados Celsius y abandonándolos por cabeza a 545 grados. En el centro del núcleo activo se generan 450 vatios de energía, en forma de calor, por centímetro de varilla de combustible.

Como material fisionable se ha escogido una mezcla combustible con una composición media de 17 por ciento de óxido de plutonio (PuO_2) y 83 por ciento de óxido de uranio (UO_2); el material fértil consiste únicamente en óxido de uranio. Se ha obtenido una experiencia larga y satisfactoria en el empleo de estos materiales gracias al funcionamiento de los reactores Rapsodie y Phénix. De las 25.000 varillas de combustibles (de PuO_2 y UO_2) que han sido irradiadas hasta el momento en el Rapsodie, 3000 han sobrevivido a una combustión de 80.000 megavatios-día por tonelada, y algunas han llegado hasta 150.000 megavatios-día por tonelada. Menos del uno por mil de las varillas irradiadas han fallado. Hasta ahora han sido irradiadas 15.000 varillas de combustible en el núcleo del Phénix. Actualmente los subelementos se retiran del reactor cuando alcanzan una combustión de 50.000 a 65.000 megavatios–día por tonelada. No ha fallado ninguna varilla de las puestas en servicio en el Phénix.

Se está trabajando en el desarrollo de nuevos combustibles de nitruros y carburos, que presentan probablemente características de reproducción superiores a las de los empleados corrientemente, de óxidos de uranio y plutonio. Queda por demostrar si esta ventaja potencial compensa las mayores dificultades de fabricación, comportamiento bajo irradiación y reprocesado químico. Hasta ahora no se ha pensado en utilizar combustibles de nitruro y carburo en el Superphénix.

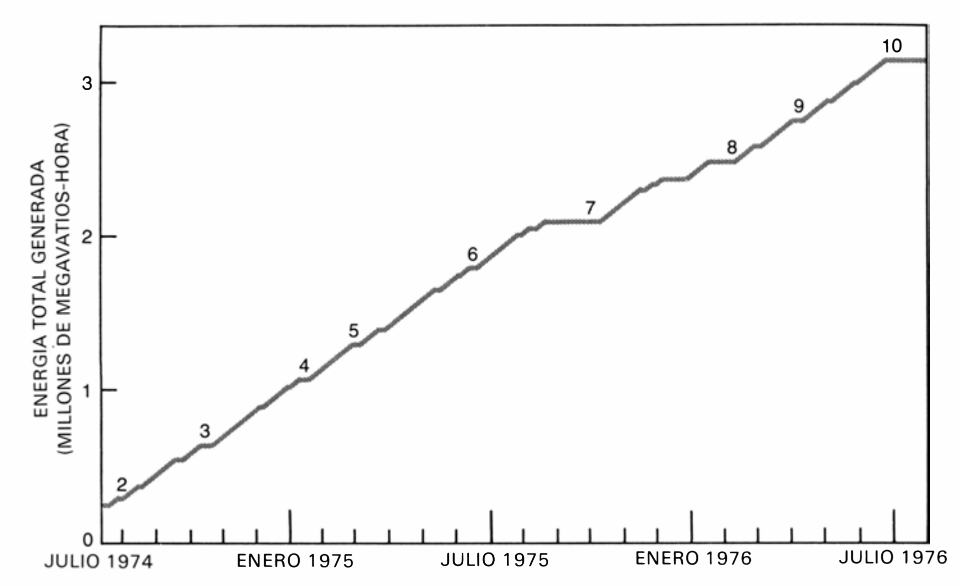
Otro importante problema técnico se refiere a la elección del material para las estructuras hexagonales de los subelementos y para los tubos de las varillas, que debe presentar unas características muy rigurosas. Debe mantener buenas características de resistencia mecánica a temperaturas que se acercan a 650 grados Celsius. La presión interna de los tubos de las varillas puede llegar a ser hasta de 30 kilogramos por centímetro cuadrado, debido a la acumulación de productos de fisión gaseosos. Las varillas están también sometidas a considerables esfuerzos térmicos. Por último, aunque no lo menos importante, están expuestas a un fenómeno peculiar: bajo una prolongada irradiación por neutrones rápidos, se forman huecos en la malla cristalina del metal y crecen en su interior cavidades muy pequeñas, que hacen que el metal se hinche. Se puede tener una somera idea de la intensidad del bombardeo de neutrones en un reactor de neutrones rápidos de alta potencia considerando que cada átomo del material que recubre las varillas de combustible se ve obligado a vibrar una vez cada cien horas por término medio, debido al paso de un neutrón o de otro átomo rebotado de la colisión con un neutrón. Otra cifra impresionante es el total de neutrones rápidos que cruzan un centímetro cuadrado del material recubridor, después de la irradiación en el núcleo del reactor: ¡la cifra se aproxima a un gramo de neutrones! El hinchamiento de las aleaciones metálicas debido a la irradiación de neutrones ha de mantenerse en un valor pequeño, para evitar deformaciones del subelemento, lo que sería causa de que aparecieran problemas en el funcionamiento del reactor, especialmente en las operaciones de manipulación del combustible. Se ha trabajado mucho en investigación y técnica, pero debe hacerse más todavía para encontrar una total solución del problema.

Los distintos tipos de reactores de neutrones rápidos se distinguen básicamente por la disposición del circuito primario de sodio. En el diseño en recipiente, el núcleo del reactor, el cambiador de calor intermedio y las bombas de sodio

del circuito primario están alojados en un único recipiente de grandes dimensiones. En el diseño en circuito, sólo el núcleo del reactor está alojado en el interior del recipiente, y los cambiadores de calor intermedios y las bombas están conectados al núcleo mediante bucles (o circuitos). Debe hacerse hincapié en que los dos sistemas se basan en la misma tecnología, en que la mayor parte de los trabajos técnicos son comunes a ambos, y que las diferencias entre las dos concepciones son mucho menores que las que hay, por ejemplo, entre los reactores de agua a presión y los reactores de agua en ebullición. En la mayoría de los países se construyó primero reactores de tipo en circuito, puesto que la separación de sus componentes facilita la construcción, el funcionamiento y el mantenimiento, lo que justifica esta elección en un primer estadio de proyecto. El primer reactor reproductor de tipo en recipiente del mundo fue construido en los Estados Unidos hace más de 10 años. Después de la construcción del Rapsodie, de tipo en circuito, se adoptó para el Phénix el tipo en recipiente; dado el excelente resultado de esta planta, se mantuvo sin modificaciones fundamentales para el Superphénix.

Está claro que pueden construirse y funcionar tanto el sistema en recipiente como el sistema en circuito, y que ambos tienen ventajas e inconvenientes que sólo una larga experiencia en su explotación puede distinguir. Entre las principales razones para la selección del sistema en recipiente para el Phénix y el Superphénix, una vez comparado meticulosamente con el sistema en circuito, figuran las condiciones de seguridad. Para una gran planta, por ejemplo de 1000 megavatios o más, se pensó que la integridad del circuito primario de sodio se podría mantener más fácilmente en todas las circunstancias razonablemente previsibles si estaba contenido en un único recipiente, en vez de dispersarlo en un sistema muy intrincado de tubos y depósitos, compuesto por cientos de metros de tuberías de hasta un metro de diámetro. Si bien el recipiente principal del tipo en recipiente es mayor que el recipiente del reactor del tipo en circuito (aproximadamente 20 metros de diámetro frente a 10 metros), el primero es mucho más simple de proyectar, y, en consecuencia, su construcción, inspección y mantenimiento son mucho más fáciles. El principal problema que surge al diseñar el tipo en recipiente es el de la cobertura del recipiente principal. La solución empleada en el Phénix no podía extrapolarse a las dimensiones del Superphénix. Se decidió que el recipiente principal de acero estuviese directamente suspendido de una plancha superior de acero y hormigón, y colocar bajo la plancha una capa de aislamiento térmico metálico que se halla en contacto con la atmósfera de argón que está por encima del sodio. Las pruebas realizadas hasta la fecha indican que esta disposición es satisfactoria.

La experiencia habida en las centrales nucleares de todo tipo ha mostrado que el generador de vapor es un elemento crucial. En los reactores de neutrones rápidos deben tomarse especiales precauciones en las fases de su diseño y construcción para prevenir cualquier reacción química violenta entre el sodio y el agua, que pudiera ocurrir a causa de una grieta en uno de los tubos del cambiador. El modelo de generador de vapor seleccionado para el Phénix, único modelo del que se tenía amplia experiencia entonces, estaba subdividido en 36 módulos de baja potencia (17 megavatios



LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL PHÉNIX durante sus dos primeros años se consideraron suficientemente alentadores como para emprender la construcción del Superphénix, la siguiente etapa en el programa francés de desarrollo de reactores reproductores. Las partes horizontales de esta curva acumulativa de producción de electricidad corresponden a períodos de detención de la planta; los números indican detenciones para recarga de combustible. Después de un año de trabajo, se llevó a cabo un amplio período de operaciones de mantenimiento ya previstas, durante la séptima parada de recarga de combustible. En sus primeros dos años de operación, el Phénix generó energía a plena potencia durante el equivalente de 530 días, comportamiento superior al desempeño normal de los actuales reactores de agua ligera durante sus dos primeros años de funcionamiento.

	PHÉNIX	SUPERPHÉNIX
POTENCIA ELECTRICA GLOBAL (MEGAVATIOS)	264	1,240
POTENCIA TERMICA (MEGAVATIOS)	590	3,000
RENDIMIENTO GLOBAL (PORCENTAJE)	44.75	41.5
VOLUMEN DEL NUCLEO (LITROS)	1,227	10,820
LONGITUD DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES (METROS)	4.3	5.5
NUMERO DE VARILLAS COMBUSTIBLES POR ELEMENTO	217	271
DIAMETRO EXTERIOR DE LAS VARILLAS (MILIMETROS)	6.6	8.65
POTENCIA LINEAL MAXIMA (VATIOS POR CENTIMETRO)	430	450
VELOCIDAD DE QUEMADO (MEGAVATIOS-DIA POR TON.)	50,000	70,000
FLUJO MAXIMO TOTAL DE NEUTRONES (NEUTRONES POR CENTIMETRO CUADRADO POR SEGUNDO)	7.2×10^{15}	6.2×10^{15}
RAZON DE REPRODUCCION	1.12	1.24
TEMPERATURA DEL REVESTIMIENTO (GRADOS CELSIUS)	650	620
INTERVALO ENTRE LAS OPERACIONES DE CARGA (MESES)	2	12

PHÉNIX Y SUPERPHÉNIX: tabla comparativa. Se mantuvo en lo posible la continuidad de las elecciones tecnológicas al proyectar la planta mayor, aunque se incorporaron al diseño del Superphénix varios cambios significativos, en parte para satisfacer nuevos criterios de seguridad.

CIRCUITO PRIMARIO	NUMERO DE BOMBAS	4
	TEMPERATURA A LA ENTRADA DEL NUCLEO	395 GRADOS CELSIUS
	TEMPERATURA A LA SALIDA DEL NUCLEO	545 GRADOS CELSIUS
	CAUDAL GLOBAL DE SODIO	16,4 TONELADAS POR SEGUNDO
	PESO DE SODIO	3300 TONELADAS
CIRCUITO SECUNDARIO	NUMERO DE BOMBAS	4
	CAMBIADORES DE CALOR INTERMEDIOS	8
	TEMPERATURA A LA ENTRADA DEL CAMBIADOR DE CALOR INTERMEDIO	345 GRADOS CELSIUS
	TEMPERATURA A LA SALIDA DEL CAMBIADOR DE CALOR INTERMEDIO	525 GRADOS CELSIUS
	CAUDAL TOTAL DE SODIO	13,2 TONELADAS POR SEGUNDO
	PESO TOTAL DE SODIO EN LOS CUATRO CIRCUITOS (BUCLES)	1700 TONELADAS
CIRCUITO TERCIARIO	NUMERO DE GENERADORES DE VAPOR	4
	TEMPERATURA DEL VAPOR RECALENTADO	490 GRADOS CELSIUS
	PRESION DEL VAPOR RECALENTADO	180 BARS
	CAUDAL TOTAL DE VAPOR	1,36 TONELADAS POR SEGUNDO

ESPECIFICACIONES para el sistema de generación de vapor del Superphénix. Se espera que el uso de sodio en los circuitos primario y secundario del reactor proporcione a la nueva estación eléctrica una eficiencia térmica global comparativamente elevada, al menos del 40 por ciento.

cada uno). La subdivisión hizo posible someter tres módulos completos de tamaño real a minuciosos ensayos en las condiciones simuladas de funcionamiento. Aunque esta forma de proceder estaba justificada para un proyecto inicial, no podría mantenerse para una planta de alta potencia a causa de su coste prohibitivo. Por este motivo, tratándose del Superphénix, las investigaciones se orientaron hacia unidades de diseño distinto, y de una mayor potencia unitaria (varios cientos de megavatios). Los problemas presentados por la fabricación y funcionamiento de estas unidades no parecieron aumentar con el tamaño; pero los módulos grandes tienen defectos, el principal de los cuales es la casi imposibilidad de llevar a cabo ensayos a escala completa antes de construir la central eléctrica, así como la gran cantidad de energía eléctrica perdida si una unidad quedase fuera de servicio.

Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones normales y accidentales mediante dos simulaciones completas, una con tubos rectos de acero ferrítico, y otra con tubos helicoidales de Incoloy. Ambas resultaron completamente satisfactorias y mostraron buena concordancia con las previsiones de proyecto. Para el Superphénix, se seleccionó finalmente el modelo de tubo helicoidal, incluyéndose en cada bucle secundario un generador de vapor de 750 megavatios de potencia térmica. Puede añadirse un recalentador de vapor con el propio sodio o con vapor. En el Phénix se empleó el sistema de sodio, lo que elevó la eficiencia neta de la central al 42 por ciento. En el caso del Superphénix se adoptó el sistema de vapor, simplificando el generador de vapor y sus circuitos anexos, ya que un estudio de costes demostró que un menor activo inmovilizado compensaba la pérdida de eficiencia.

Está clara la importancia de prevenir el desarrollo de la más mínima fuga en los tubos que separan el agua del sodio, así como la de minimizar los efectos de cualquier contacto entre los dos fluidos que pudiera ocurrir a pesar de todo. En cada generador de vapor se alojarán, en distintos puntos, detectores ultrasensibles de hidrógeno (capaces de detectar fugas de apenas dos miligramos de hidrógeno por segundo). Se dispone también de sistemas automáticos para limitar las consecuencias de una reacción incipiente. Dos de tales sistemas son el de válvulas automáticas, que inmediatamente aíslan los circuitos de sodio, y los sistemas de descarga proyectados para eliminar los productos de la reacción y limitar la elevación brusca de presión resultante.

Los dispositivos necesarios para depositar los subelementos de combustible en sus posiciones en el núcleo del reactor y para retirarlos del mismo una vez irradiados se utilizarán exclusivamente en los momentos en que la planta esté parada. Estas operaciones se llevarán a cabo mediante un conjunto de dispositivos que manipulan los elementos manteniéndolos metidos en sodio en todo momento, con el fin de permitir la extracción del calor residual cedido por los productos de fisión. Dos clavijas excéntricas giratorias, alojadas en la losa superior del reactor, permitirán situar el dispositivo que sujeta las cabezas de los subelementos sobre cualquier punto del núcleo o de la envoltura. Este sistema, que asegura un servicio directo por encima de cada subelemento, resuelve también el problema de las posibles deformaciones de los subelementos debidas a su hinchamiento bajo la radiación. Uno de los principales inconvenientes del sodio es su opacidad, que hace imposible seguir visualmente la marcha de las operaciones de maniobra. Se han creado unos emisores-receptores ultrasónicos, que emplean el principio del sonar, para superar este obstáculo. Estos dispositivos, que trabajan en el seno del sodio, garantizan el que los subelementos manipulados ocupen en todo instante sus posiciones correctas, sin el riesgo de que choquen con los dispositivos de manipulación.

Los principios en que se basa el control de un reactor de neutrones rápidos son idénticos a los de otro reactor nuclear cualquiera. La existencia de neutrones retardados da tiempo a los mecanismos que actúan sobre la reactividad del núcleo para funcionar suavemente, ya sea para aumentar la potencia de la central, para disminuirla o para mantenerla estable. Estas operaciones se llevan a cabo mediante barras de control, que contienen un material absorbedor de neutrones adecuado y que se mueven en canales paralelos a los subelementos combustibles. Superphénix dispondrá de un sistema muy redundante de barras de control, divididas en tres grupos independientes. Uno de estos grupos está especialmente proyectado para penetrar en el núcleo incluso en el caso extremo e improbable de que sufriera una gran deformación. La supervisión ininterrumpida del núcleo del Superphénix se lleva a cabo mediante un conjunto diversificado de detectores, cuyas señales se procesan y correlacionan por computador. La temperatura del sodio que sale de cada subelemento se mide por tres termopares; dos de ellos son del tipo de chromel-alumel y el tercero usa un par sodio-acero y reacciona casi instantáneamente. Los detectores de ebullición de sodio, medidores de caudal y dispositivos para la detección y localización de fallos en el revestimiento son versiones mejoradas de los empleados en el Phénix. Los detectores de neutrones y los instrumentos electrónicos para la medición de variaciones de reactividad han demostrado su buen funcionamiento durante la

larga experiencia habida con el Phénix.

Las autoridades administrativas sometieron a una comprobación rigurosa todas las múltiples medidas de seguridad incorporadas al proyecto del Superphénix antes de dar su aprobación. Tales medidas de seguridad disminuyen hasta un nivel extremadamente bajo la probabilidad de un accidente. El procedimiento seguido llegó hasta el extremo de considerar el caso de que a un paro total dela circulación forzada de sodio a través de núcleo del reactor a plena potencia no le siguiera ninguna acción de los numerosos sistemas de control proyectados para detener de inmediato la cadena de reacciones de fisión y la producción de energía. Incluso en este caso, la considerable inercia térmica que representa la gran masa de sodio existente en el recipiente principal (3300 toneladas) y la diferencia de algunos cientos de grados Celsius entre su temperatura normal de trabajo y su punto de ebullición conceden un intervalo de tiempo suficiente para poder emprender una acción manual de emergencia. No obstante, es necesario tener la certidumbre de que incluso en el caso muy improbable de un grave accidente que produzca fusión del núcleo, las consecuencias quedarían contenidas de tal manera que ninguna cantidad significativa de plutonio o productos de fisión pudieran escapar hacia el medio ambiente.

Por esta razón, el sistema de contención del Superphénix consiste en una serie de receptáculos sucesivos, que pueden resistir tanto a los accidentes in-

REACTOR	SITUACION	POTENCIA (MEGAVATIOS	FORMA DE SALIDA	DISEÑO BASICO	PROGRAMA
REPRODUCTOR EXPERIMENTAL 1	EE. UU.	2	ELECTRICA	CIRC.	
REACTOR RAPIDO DOUNREAY	G. B.	15	ELECTRICA	CIRC.	
REPRODUCTOR EXPERIMENTAL 2	EE. UU.	20	ELECTRICA	RECIP.	
BR 5	URSS	10	TERMICA	CIRC.	
REPRODUCTOR RAPIDO ENRICO FERMI	EE. UU.	66	ELECTRICA	CIRC.	
RAPSODIE	FRANCIA	40	TERMICA	CIRC.	
BN 350	URSS	150	ELECTRICA	CIRC.	
RAPIDO EXPERIMENTAL DE OXIDO, DEL SUDOESTE	EE. UU.	20	ELECTRICA	CIRC.	
BOR 60	U.R.S.S.	12	TERMICA	CIRC.	
PROTOTIPO DE REACTOR RAPIDO	G. B.	250	ELECTRICA	RECIP.	
PLANTA DE ENSAYO DE FLUJO RAPIDO	EE. UU.	400	TERMICA	CIRC.	
KNK 2	ALEMANIA	20	ELECTRICA	CIRC.	
PHÉNIX	FRANCIA	250	ELECTRICA	RECIP.	
PEC	ITALIA	116	TERMICA	CIRC.	
SNR 300	ALEMANIA	300	ELECTRICA	CIRC.	
JOYO	JAPON	100	TERMICA	CIRC.	
BN 600	URSS	600	ELECTRICA	RECIP.	
REACTOR DE ENSAYO REPRODUCTOR RAPIDO	INDIA	15	ELECTRICA	CIRC.	
REPRODUCTOR CLINCH RIVER	EE. UU.	380	ELECTRICA	CIRC.	
REACTOR RAPIDO COMERCIAL	G. B.	1300	ELECTRICA	RECIP.	
SUPERPHÉNIX	FRANCIA	1200	ELECTRICA	RECIP.	
MONJU	JAPON	300	ELECTRICA	CIRC.	
SNR 2	ALEMANIA	1300	ELECTRICA		
BN 1550	URSS	1500	ELECTRICA		
PROTOTIPO REPRODUCTOR	EE. UU.	1200	ELECTRICA		
					1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980

TIPO DE INSTALACION	FASE DE PROYECTO	FASE DE CONSTRUCCION	FASE DE FUNCIONAMIENTO
REACTOR EXPERIMENTAL			
PLANTA DE DEMOSTRACION			
PROTOTIPO COMERCIAL			

RESUMEN MUNDIAL del avance en el desarrollo de los reactores reproductores rápidos enfriados por metales fundidos, que registra todas las instalaciones con una potencia térmica de salida de más de un megavatio. Las plantas están tabuladas por orden cronológico según la fecha de iniciación de su etapa de proyecto. Se ha empleado distintos colores para distinguir las tres categorías principales de reactores construidos o programados en el futuro: reactores experimentales, plantas de demostración y prototipos de centrales eléctricas comerciales. Las distintas intensidades de color indican las fases de diseño, construcción y operación. Se dan extrapolaciones sólo hasta 1980. Las barras que se detienen poco antes de la fecha presente indican realizaciones terminadas. S.N.R. 300, Superphénix y S.N.R. 2 son proyectos multinacionales europeos. El reactor alemán K.N.K. se puso en marcha a partir de 1968 con un núcleo de neutrones lentos; a principios de 1977 había de entrar en servicio con un núcleo de neutrones rápidos con el nombre de K.N.K. 2. El prototipo británico de reactor rápido de Dounreay, en Escocia, y el reactor ruso B.N. 350 de Shevchenko, que son dos centrales de demostración comparables en tamaño a la Phénix francesa, han sido terminadas, pero no han trabajado todavía a plena potencia, debido a las dificultades aparecidas en sus equipos de generación de vapor. Los trabajos preliminares de implantación de la planta norteamericana más parecida, el proyecto de 380 megavatios de Clinch-River, cerca de Oak Ridge, en el estado de Tennessee, están a punto de empezar, y se espera que estén terminados en los primeros años de la década de los 80.

ternos del reactor como a las agresiones externas, tales como un avión que se estrellase contra la central nuclear. Finalmente, se han adoptado especiales disposiciones para prevenir posibles incendios por sodio y para limitar los posibles efectos de los que pudieran ocurrir. Los incendios por sodio no pueden comprometer la seguridad de la instalación, pero, a pesar de todo, es necesario adoptar precauciones exhaustivas para maximizar la fiabilidad y la disponibilidad de la central.

En todos los campos, y no sólo en el campo prioritario de la seguridad, un esfuerzo considerable de investigación y de desarrollo ha precedido al proyecto y a la construcción del Superphénix. Este programa, que exige ensayos a escala total, con todas las piezas en las que se hayan realizado innovaciones inmersas en sodio, continuará para respaldar la construcción del reactor.

El Phénix se construyó en algo más de cuatro años. La preparación preliminar del emplazamiento empezó a finales de 1968, y el llenado de los circuitos primario y secundario con 1400 toneladas de sodio se realizó antes de finalizar 1972. Para el Superphénix se ha adoptado un programa de construcción que se prolongará por 68 meses. Las fechas límite de su construcción son comparables a las fijadas para otros tipos de centrales nucleares. El hecho de que los reactores reproductores no estén presionizados y que sus componentes, incluso los de gran tamaño, estén fabricados con chapas y tubos de acero inoxidable de espesor relativamente pequeño hacen posible llevar a cabo la mayor parte del montaje final en el lugar. La experiencia habida con el Phénix muestra claramente las ventajas de este procedimiento y la flexibilidad con que permite cumplir con la programación de la construcción.

La inversión necesaria para la central Superphénix será muy superior a la de una central de agua ligera de potencia comparable. Esta diferencia en el coste es inevitable, pues el Superphénix es la primera instalación de su clase, mientras que las centrales de agua ligera (de las que hay más de 100 construidas hasta la fecha en el mundo) han aprovechado ampliamente los frutos del progreso técnico, y sobre todo la producción en serie. A pesar de que el Superphénix es un prototipo, debe destacarse que el coste de un kilovatio-hora producido por él será del mismo orden que el producido por una central térmica. Es probable que el activo inmovilizado de las centrales reproductoras rápidas, que decrecerá progresivamente a medida que se construyan instalaciones mayores, seguirá siendo por cierto tiempo mayor que el de las centrales de agua ligera, aunque sólo fuese por las mayores cantidades de acero inoxidable empleado, y por la presencia de un circuito de sodio intermedio añadido por razones de seguridad. La competitividad económica con las centrales de agua ligera provendrá de un ciclo más barato del combustible, factor que tendrá importancia creciente con el incremento del precio del uranio natural.

El programa de expansión de la compañía nacional francesa de electricidad Electricité de France (EDF) ya cuenta con una serie de centrales reproductoras, que emplearán el plutonio suministrado por un gran número de reactores de agua a presión construidos simultáneamente. Es razonable esperar que entre 1980 y 1985 se inicien en Francia dos parejas de centrales de neutrones rápidos, que representarán, conjuntamente con el Superphénix, unos 8000 megavatios de capacidad de generación de energía, que podrían estar en servicio en los primeros años de la década de los 90. Los nuevos proyectos de instalación pueden crecer hasta 2000 megavatios por año después de 1985, por lo que hacia el año 2000 las centrales de neutrones rápidos podrían cubrir del orden de una cuarta parte de la capacidad instalada y un tercio de la energía producida por todas las centrales nucleares de Francia. Simultáneamente con el inicio de la construcción de estas centrales, se empezará la construcción de instalaciones para la fabricación y reutilización del combustible de reproductores rápidos, cerrando así el ciclo de combustible. Estas últimas serán instalaciones de gran capacidad (con una producción de unas 200 toneladas de óxidos por año) destinadas a conseguir un bajo coste global del ciclo del combustible.

La importancia de la central Superphénix debe valorarse en relación con la siguiente generación de centrales procedentes de ella. Es, en cierto sentido, la culminación de una fase de desarrollo tecnológico y el estadio final antes de las series comerciales, cuyas características técnicas se basarán directamente en la experiencia habida con el Superphénix. Si todo ocurre como está previsto, a mitad de la década de los 80, gracias al Superphénix, se obtendrá, por lo menos, un informe preliminar del funcionamiento de una gran central de neutrones rápidos. Esta experiencia, que será compartida por varias grandes compañías eléctricas, simboliza la unión de esfuerzos de los países europeos interesados en conseguir lo antes posible la construcción comercial de un tipo de reactor que se hace indispensable para sus economías.

Ondas en el viento solar

El viento solar es la atmósfera exterior del sol que se expande por el espacio. Las variaciones en su velocidad de propagación se interpretan como ondas cuya amplitud aumenta con la distancia

J. T. Gosling y A. J. Hundhausen

La corona, esa tenue atmósfera exterior del sol, ha sido durante cientos de años conocida por los observadores como un débil resplandor plateado que rodea el negro disco de la luna durante un eclipse solar. Aunque analizada espectroscópicamente por primera vez en el siglo XIX, la característica más notable de la corona permaneció incógnita hasta la década de 1940. En esa época, ciertas líneas de emisión en el espectro de la corona, que antes no se habían identificado, se reconocieron como radiación emitida por elementos corrientes, tales como el oxígeno y el hierro, que habían sido despojados de la mayor parte de sus electrones periféricos. La presencia en la corona de tales átomos altamente ionizados se puede explicar solamente si la temperatura de la corona supera el millón de grados Kelvin, más de cien veces más alta que la subyacente superficie visible del sol. La energía térmica del gas ionizado de la corona es, en efecto, tan grande, que ni siquiera el enorme campo gravitatorio del sol puede retener la corona como una atmósfera estática ligada a él. Por el contrario, el gas coronal se proyecta hacia fuera del sol a elevadísima velocidad e inunda el espacio interplanetario con viento solar.

Los satélites y vehículos que han venido explorando el espacio interplanetario desde los últimos 15 años han detectado directamente el viento solar y han registrado su flujo en la vecindad de la órbita terrestre. Las observaciones revelan que el viento solar fluye casi radialmente desde el sol a una velocidad media de 450 kilómetros por segundo, es decir, más de un millón y medio de kilómetros por hora. Sin embargo, el flujo del viento solar dista mucho de ser uniforme; en realidad, es extremadamente racheado. Su velocidad suele variar en cientos de kilómetros por segundo en el curso de una semana. De esas variaciones, las mayores pueden considerarse como ondas de velocidad, cuya forma evoluciona a medida que se propagan desde el sol hasta las regiones más remotas del sistema solar. También se encuentran otros tipos de ondas en el viento solar, pero no nos ocuparemos de ellos aquí.

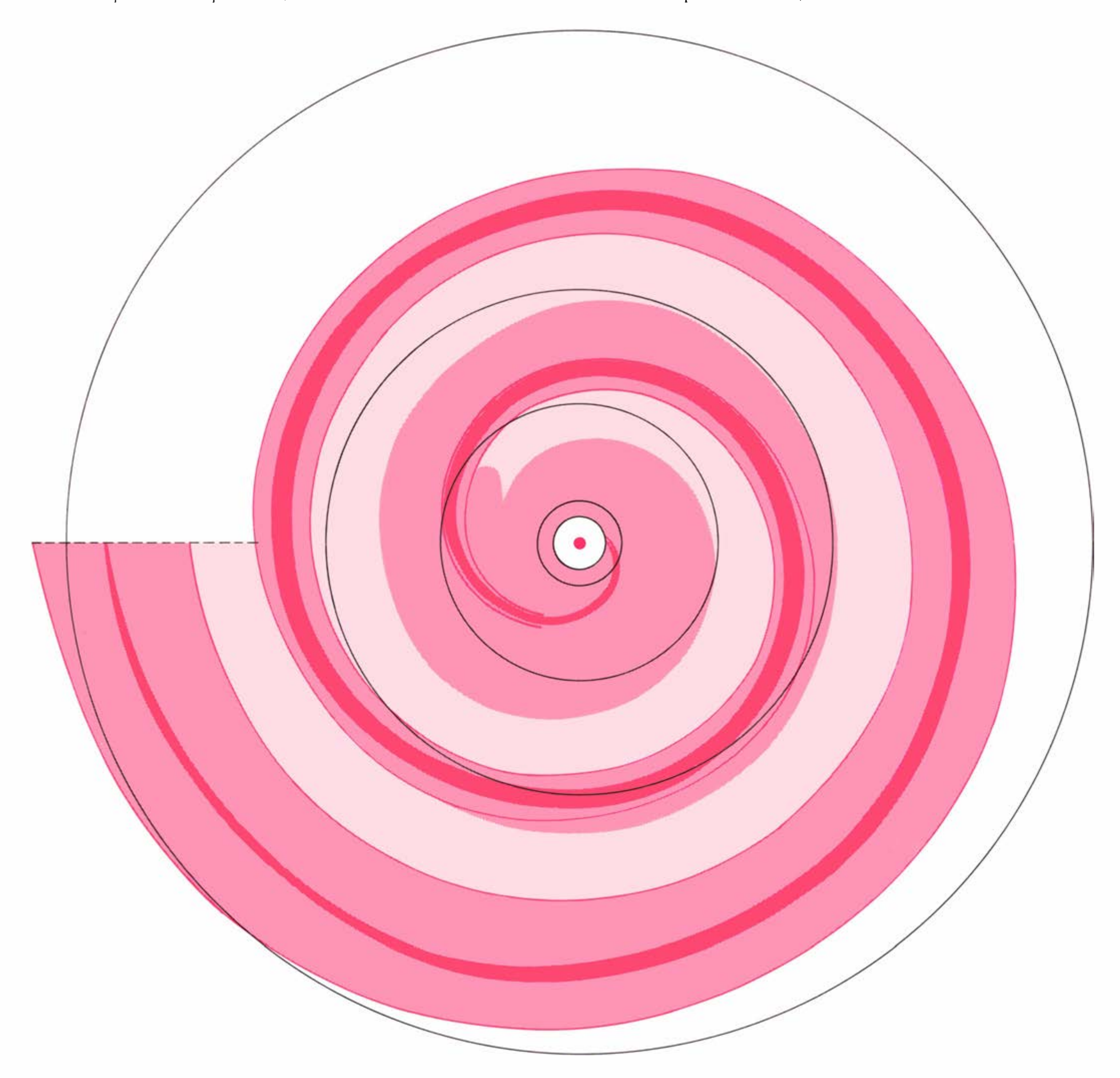
Como la corona, el viento solar es un plasma muy enrarecido, es decir, un gas ionizado compuesto principalmente de protones y electrones libres. Al propagarse casi radialmente desde el sol a una velocidad casi constante, su densidad decrece a un ritmo que es, aproximadamente, proporcional al valor recíproco del cuadrado de su distancia al sol. Al alcanzar la órbita de la tierra, su densidad es de unas 10 partículas por centímetro cúbico; en la órbita de Júpiter debe ser de unas 0,4 partículas por centímetro cúbico. A medida que el viento solar se expande, también se enfría; en la vecindad de la órbita terrestre, su temperatura ha bajado desde el millón de grados hasta unos 100.000 grados. A esa temperatura, la velocidad del sonido en ese gas es de unos 50 kilómetros por segundo. Como en la órbita de la tierra el viento solar viaja a unos 450 kilómetros por segundo, la velocidad del gas es nueve veces mayor que la del sonido, es decir, el flujo es altamente supersónico. Las observaciones de los vehículos espaciales revelan además que el gas incorpora un débil resto del campo magnético solar; cerca de la órbita terrestre, el valor medio del campo es de 0,00005 gauss. (La intensidad del campo magnético terrestre en la vecindad de los polos es de 0,6 gauss.)

Para comprender cómo se forman y evolucionan las ondas en el viento solar, es útil considerar a éste como si se tratara de un fluido compresible ordinario. Tal enfoque, sin embargo, omite los detalles de los complicados procesos cinéticos internos que son los responsables de que tan tenue gas se comporte como un fluido. En la vecindad de la órbita de la tierra, la densidad del gas es muy baja, hasta el punto de que un protón cualquiera del viento solar quizá choque con uno de sus vecinos sólo una vez cada dos o tres días, por término medio. Por consiguiente, otros procesos distintos del choque directo entre partículas deben ser los responsables de que un gas tan diluido actúe como un fluido. Esos otros procesos no han sido todavía completamente explicados, aunque parece probable que las inestabilidades inherentes a un plasma en presencia del débil campo magnético existente en el espacio interplanetario sean, en último término, causantes de ello.

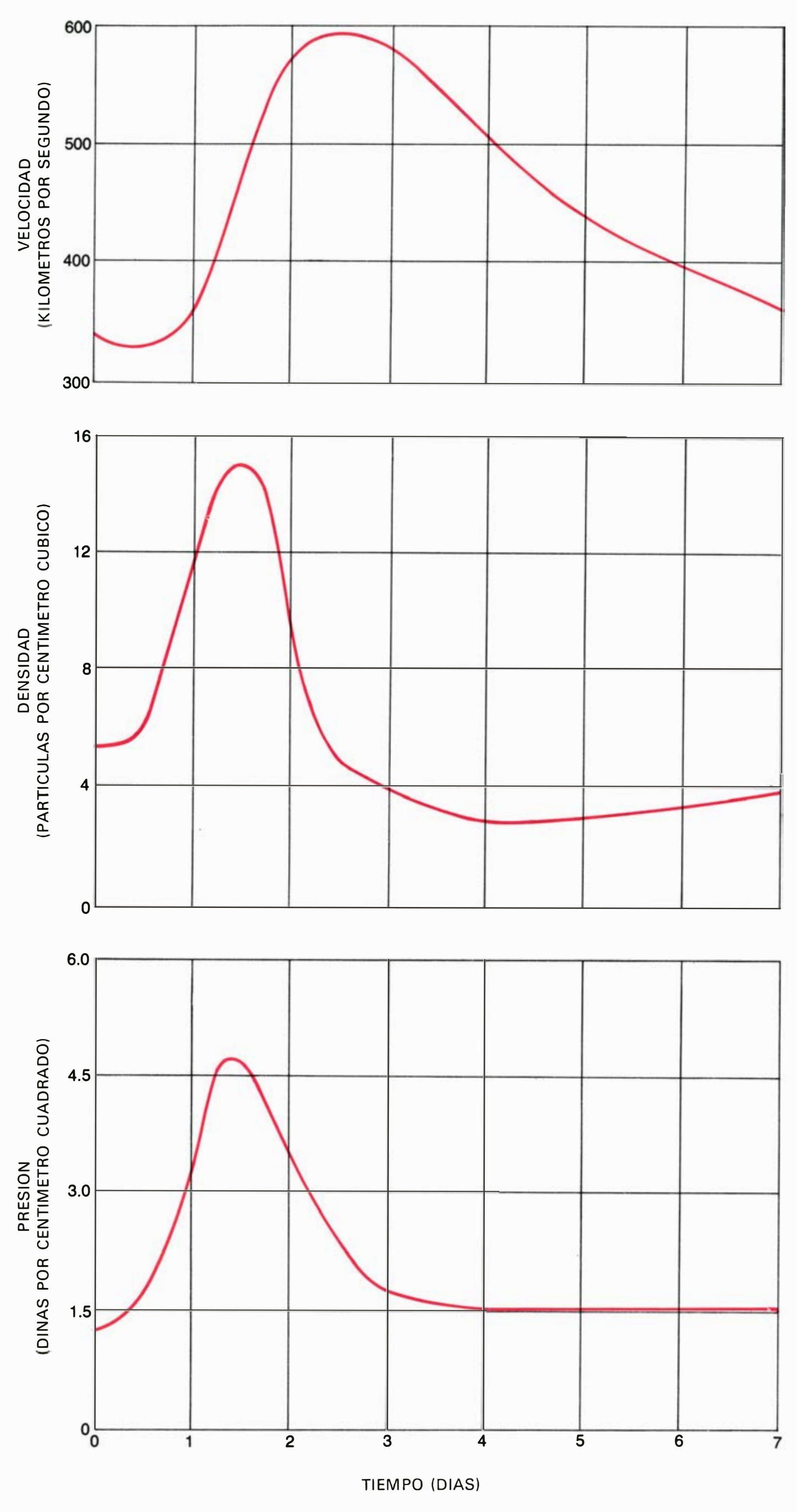
Las observaciones realizadas desde vehículos espaciales cerca de la órbita de la tierra han puesto de manifiesto que las principales variaciones de la velocidad, densidad y presión del viento solar se ajustan a un esquema característico, que ha dado en llamarse estructura de los chorros de viento solar. En la parte frontal de un chorro de viento solar, la velocidad del flujo del viento aumenta rápidamente; en la parte trasera de la corriente, la velocidad disminuye con mucho mayor lentitud, volviendo a valores bajos. En el borde frontal, donde la velocidad aumenta, la densidad de partículas del gas también lo hace alcanzando rápidamente un máximo que es

varias veces mayor que la densidad media. En la parte de cola, donde la velocidad decrece, ocurre lo mismo con la densidad, que alcanza valores anormalmente bajos. La presión medida en secciones perpendiculares a la corriente, que es proporcional al producto de la densidad por la temperatura, también alcanza un máximo donde la velocidad crece, pero disminuye de nuevo rápidamente y queda casi constante a lo largo de una gran parte de la cola del chorro. Esta estructura característica de variación cerca de la órbita de la tierra se explica fácilmente si se considera el chorro como una onda de velocidad que se hace más abrupta a medida que se va alejando del sol.

¿Cómo comienzan a desarrollarse las ondas de velocidad en el viento solar? ¿Qué es lo que las hace más abruptas? La falta de uniformidad en la velocidad del viento solar proviene, en último término, de la falta de uniformidad de la



UN CHORRO DE VIENTO SOLAR *(banda ancha de color)* **se propaga a partir del sol** *(punto coloreado),* **curvándose a causa de la rotación del sol en una figura que recuerda a una espiral. Tal chorro se puede considerar como una onda originada cuando el gas en expansión de una de las regiones de la corona, o atmósfera exterior del sol, se mueve más rápidamente que el de otras regiones. Para cada longitud dada del espacio, el gas más veloz de la onda irá ganando terreno sobre el gas más lento situado delante de ella; simultáneamente, irá dejando atrás al gas más lento en su parte posterior. Así, el gas del borde anterior de la onda se comprimirá** *(banda estrecha de color más oscuro)* **y el gas de la región de cola se enrarecerá** *(color más claro).* **A una distancia al sol de unas tres unidades astronómicas (una unidad astronómica es la distancia media del sol a la tierra), esta onda de viento solar, en particular, originará dos ondas de choque** *(líneas continuas de color)* **que divergen a partir de la región de máxima compresión. La onda misma se ensancha a medida que se aleja del sol, y su amplitud, o diferencia entre la velocidad del gas más rápido y la del más lento, decrece. Aquí, el desarrollo de la onda sigue hasta una distancia de 20 unidades astronómicas; las circunferencias concéntricas en trazo fino y negro marcan las órbitas de la tierra (una unidad astronómica desde el sol), Marte (1,5 unidades astronómicas), Júpiter (5,2 unidades astronómicas), Saturno (9,5 unidades astronómicas) y Urano (19,2 unidades astronómicas). A la escala de esta ilustración no es posible describir la evolución de la onda dentro de la órbita terrestre. Si la onda del viento solar continuase más allá de 20 unidades astronómicas durante una revolución más, la onda de choque de la cola de la revolución siguiente (no representada) cortaría la onda de choque del frente de onda perteneciente a la más externa de las revoluciones mostradas.**



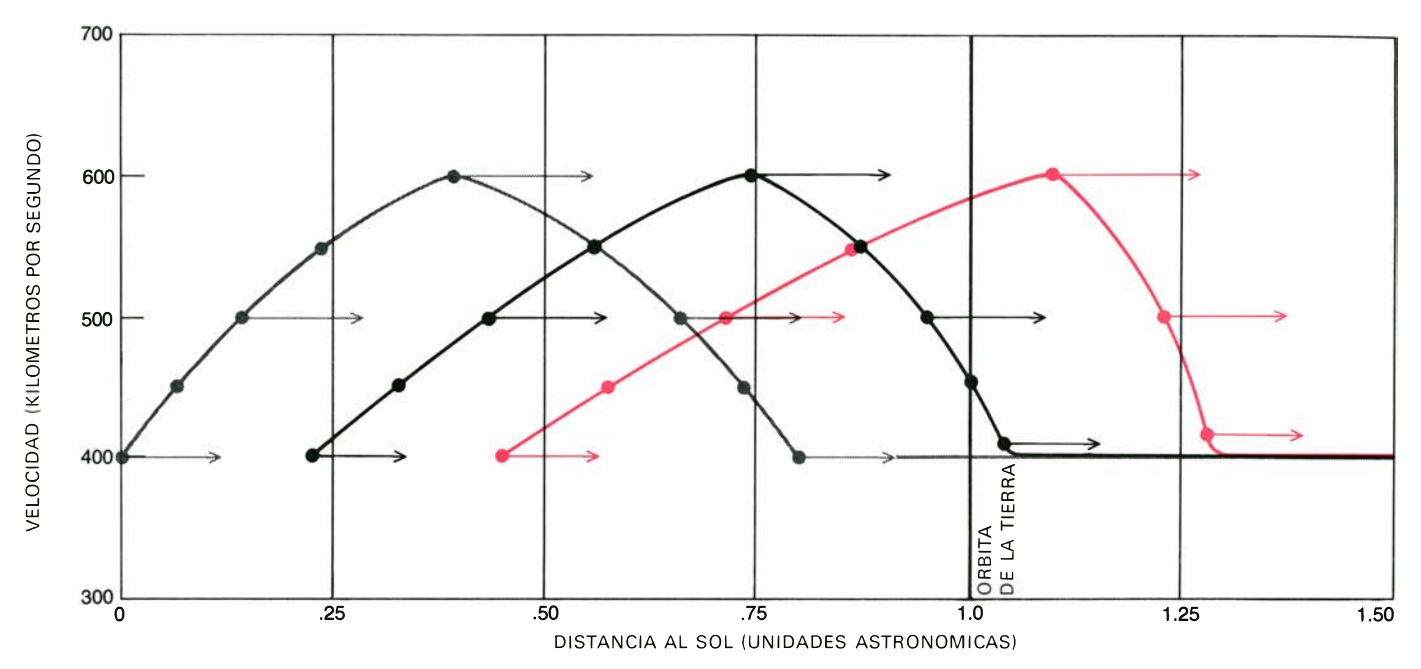
PERFIL IDEALIZADO DE UN CHORRO de viento solar, determinado a partir de muchas observaciones de ondas de viento solar que han alcanzado a un satélite en órbita alrededor de la tierra. El frente del perfil del chorro se halla a la izquierda de cada cuadro. Dentro de una onda de esta clase, la velocidad del viento solar aumenta rápidamente hasta un máximo, para decrecer con lentitud y retornar a un valor bajo *(arriba)*. A medida que el gas más veloz alcanza al más lento que se halla delante de él, la densidad del gas aumenta bruscamente en el borde anterior *(centro)*, dejando detrás un área de enrarecimiento. A medida que aumenta la densidad, la presión del gas aumenta también, decreciendo en la cola de la onda *(abajo)*.

temperatura y la densidad de la corona. Esta falta de uniformidad coronal se debe principalmente al hecho de que el campo magnético solar, que atraviesa la corona, es también variable de un lugar a otro del sol. Así, las distintas porciones de la corona que escapan al espacio para convertirse en viento solar se expanden hacia el exterior a velocidades diferentes.

Consideremos ahora lo que ocurre en la tierra conforme el sol gira una vez cada 27 días. El gas dirigido hacia la tierra es, alternativamente, lento, después rápido y luego nuevamente lento. La variación de la velocidad desde valores bajos hasta altos y nuevamente a valores bajos constituye un chorro completo u onda del viento solar. El gas más rápido de la onda alcanza y adelanta al más lento que se encuentra delante, chocando con él mientras simultáneamente se escapa del gas más lento que se encuentra detrás de la onda. De aquí que la onda vaya evolucionando hacia la forma de diente de sierra a mayores distancias del sol. Como el gas es compresible, la materia del interior de la onda se reordena a medida que la onda se hace más abrupta. Las partículas aisladas de gas que están cerca del frente de la onda se comprimen y calientan, y las que están en la parte de cola se enrarecen y enfrían.

Parte del gas que va por delante, y que se mueve más despacio, es barrido por la onda y acelerado. El intercambio resultante de cantidad de movimiento y energía entre el gas más rápido y el más lento hará decrecer ligeramente la amplitud de la onda: la máxima diferencia de velocidad del gas de un punto a otro de la onda. Un observador cercano a la órbita de la tierra vería la onda de velocidad desarrollada y sus regiones acompañantes de compresión y rarefacción pasando ante su punto de observación. Las variaciones momentáneas de densidad, velocidad y presión asociadas con los chorros de viento solar se pueden identificar fácilmente con tales ondas de velocidad desarrolladas.

Las ondas de velocidad del viento solar se hacen más abruptas a medida que aumenta su distancia del sol, tal como ocurre con las olas oceánicas al acercarse a una playa. Por supuesto, existen diferencias entre las olas oceánicas y las ondas del viento solar. En primer lugar, el agua es incompresible, mientras que el viento solar se comprime fácilmente. En segundo lugar, las olas del mar transportan energía y cantidad de movimiento, pero no masa, mientras que el viento solar transporta energía, cantidad de movimiento y masa desde el sol hasta las regiones más alejadas del sistema solar.



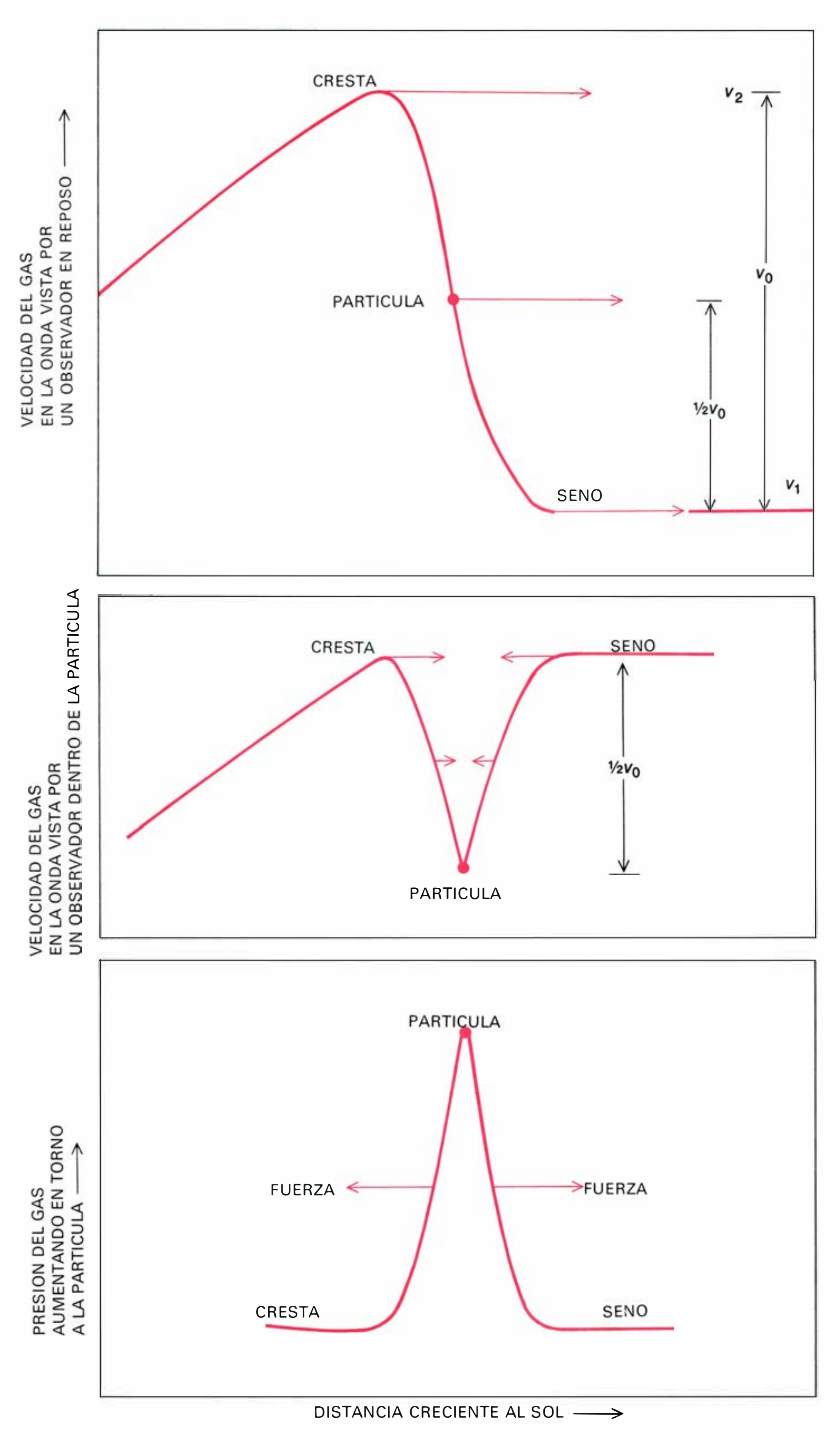
LAS ONDAS DE VELOCIDAD del viento solar se hacen más acusadas a medida que se alejan del sol en forma parecida a como las olas oceánicas se hacen más abruptas al acercarse a una playa; la cresta de la onda se mueve más rápidamente que el seno, de modo que va alcanzándolo gradualmente. En esta superposición de tres "instantáneas" de una onda de velocidad del viento solar idealizada, hechas con un día de diferencia, se puede ver mejor cómo las partículas individuales, o pequeños volúmenes de gas *(puntos)* de frente de la onda se comprimen, constituyendo regiones de alta densidad, en tanto que las que se hallan en la cola se expanden en una región de baja densidad.

En el caso de las olas oceánicas, la velocidad de la ola en aguas poco profundas es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua. De aquí que, al acercarse a una playa, las crestas de las olas viajen más rápidamente que los senos, que se hallan a menor profundidad, y las olas se hagan más abruptas. En ocasiones, las olas oceánicas grandes que corren hacia una playa se hacen tan abruptas que las crestas adelantan literalmente a los senos. En ese punto, las olas se desploman y rompen. ¿Qué pasa en el viento solar cuando, a grandes distancias del sol, la cresta de una onda de velocidad empieza a adelantar al seno? En otras palabras, ¿cuál es la analogía interplanetaria de una ola que rompe?

Examinemos con mayor detalle la situación de una partícula aislada de gas que se encuentre a mitad de altura del borde frontal de una onda de velocidad del viento solar cuya amplitud sea v_0 *(véase la ilustr. de la página siguiente)*. El gas del seno que precede a la onda se está moviendo más despacio que la partícula, de modo que ésta le está ganando terreno. El gas de la cresta de la onda detrás de la partícula se está moviendo más rápidamente que ésta, y, por tanto, está adelantándola. Un observador que se moviese con la partícula vería que hay gas avanzando hacia ella tanto desde el sol (el gas de la cresta, más rápido) como desde la dirección opuesta al sol (el gas en el seno, más lento) a velocidades que varían hasta un máximo de 1/2 v_0. No vería, sin embargo, que el gas penetrase en la partícula porque el débil campo magnético incluido en el viento solar impide que las partículas se interpenetren. En consecuencia, la presión se eleva en el gas alrededor de la partícula, y ésta resiste el influjo de gas procedente de ambos lados. Para el observador que se mueve con la partícula, el gas que viene de ambos lados es decelerado, comprimido y calentado al encontrar la región de alta presión. Para un observador estacionario que vigile la onda de viento solar desde un punto fijo en el espacio, la deceleración que viene de ambas direcciones aparecerá solamente como una deceleración del gas de alta velocidad cerca de la cresta y una aceleración del gas lento cerca del seno. Como resultado, se transfiere cantidad de movimiento y energía desde el gas que se mueve más rápidamente en la cresta al gas que se mueve despacio en el seno.

En este punto es en donde la naturaleza supersónica del viento adquiere importancia. La velocidad del sonido, *s*, es la velocidad característica con la cual las variaciones de presión de pequeña amplitud se propagan en un gas. Por tanto, cuando la onda de viento solar se hace más abrupta, la región de alta presión se expande contra el gas situado delante y detrás de ella a la velocidad del sonido. Cuando el gas del seno experimenta el impulso de presión, es acelerado a expensas de la velocidad del gas de la cresta. En efecto, en tanto que la máxima velocidad de la onda sea tal que la velocidad del gas que converge (1/2 v_0) resulte inferior a la del sonido *(s)*, el impulso de presión será siempre experimentado por partículas de gas tanto en el seno de la onda como en su cresta antes de que ésta se desplome en el seno. Es decir, en tanto que el valor de s - 1/2 v_0 sea mayor que cero, la onda se amortiguará gradualmente.

¿Qué sucede cuando la amplitud de la onda de viento solar es tal que la velocidad del gas que converge sobre la porción es mayor que la del sonido? En ese caso, la región de alta presión, que intenta dilatarse en ambas direcciones a la velocidad del sonido, no puede hacerlo con suficiente rapidez para avisar al gas del seno anterior (y de la cresta posterior) de la inminente llegada de la onda. Lo que sí ocurre es que la presión en el interior de la onda, en el lugar donde está la partícula, crece muy rápidamente a medida que la onda continúa haciéndose más abrupta: tan rápidamente, que se forman dos ondas de choque, una a cada lado de la región de alta presión. Una de ellas se propaga hacia atrás desde la región central de alta presión hacia la cresta de la onda: la otra se propaga hacia adelante en dirección al seno. Las ondas de choque son ondas de presión de gran amplitud, en las cuales la presión, densidad y velocidad cambian rápidamente: se propagan en el gas a velocidad superior a la del sonido. En efecto, la velocidad a la que ambas ondas de choque viajan a través del viento solar está



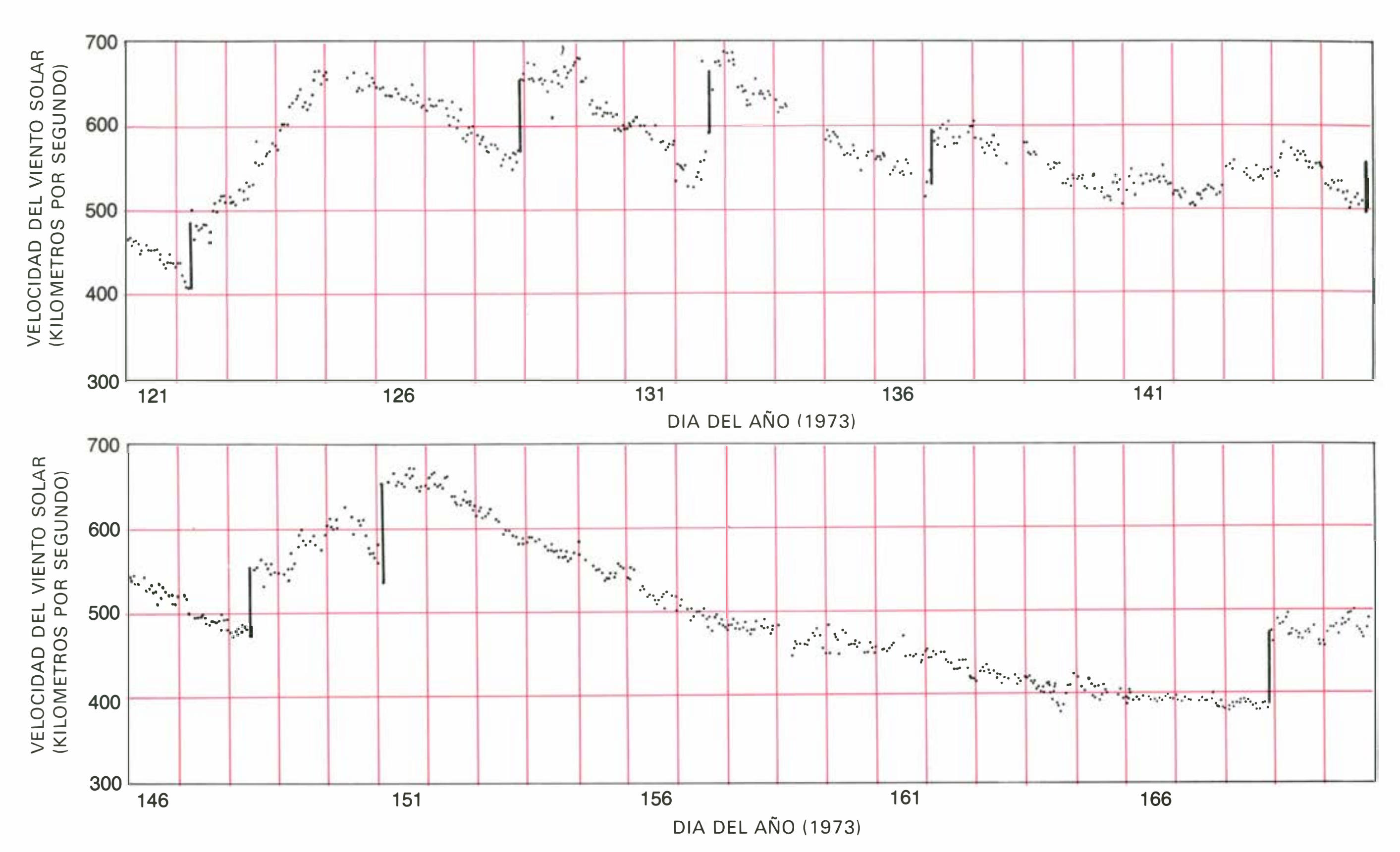
LA ALTURA DE LA CRESTA de las ondas de velocidad del viento solar queda limitada por el aumento de la presión en el borde anterior de la onda. El cuadro de arriba muestra una onda desarrollada de amplitud v_0 donde v_0 es igual a la diferencia entre la velocidad de la cresta de la onda (v_2) y la velocidad del seno (v_1). Una partícula de gas a mitad de altura se mueve a 1/2 v_0 con respecto al seno. Un observador que se moviera con la partícula vería el gas fluyendo hacia él tanto desde la cresta, donde el gas se mueve más rápidamente, como desde el seno, donde lo hace más despacio, a velocidades variables hasta un máximo de 1/2 v_0 *(centro)*. El gas que converge hace que la presión aumente alrededor de la partícula; ésta resiste la entrada de gas desde ambos lados *(abajo)*. Un observador estacionario que mirase la onda desde un punto fijo en el espacio, apreciaría que el gas lento del seno estaría siendo acelerado y el gas rápido en la cresta estaría siendo frenado. Si la velocidad del gas que se mueve hacia la porción central (1/2 v_0) es superior a la del sonido, se forman dos ondas de choque alrededor de la región de alta presión y divergen desde ella, viajando una hacia atrás, en dirección a la cresta, y la otra hacia delante, en dirección al seno. Las ondas de choque impiden que la onda se desplome y "rompa".

precisamente determinada por la magnitud del incremento de presión dentro de la onda de viento solar, y esa velocidad es exactamente la requerida para evitar que la onda se desplome y rompa.

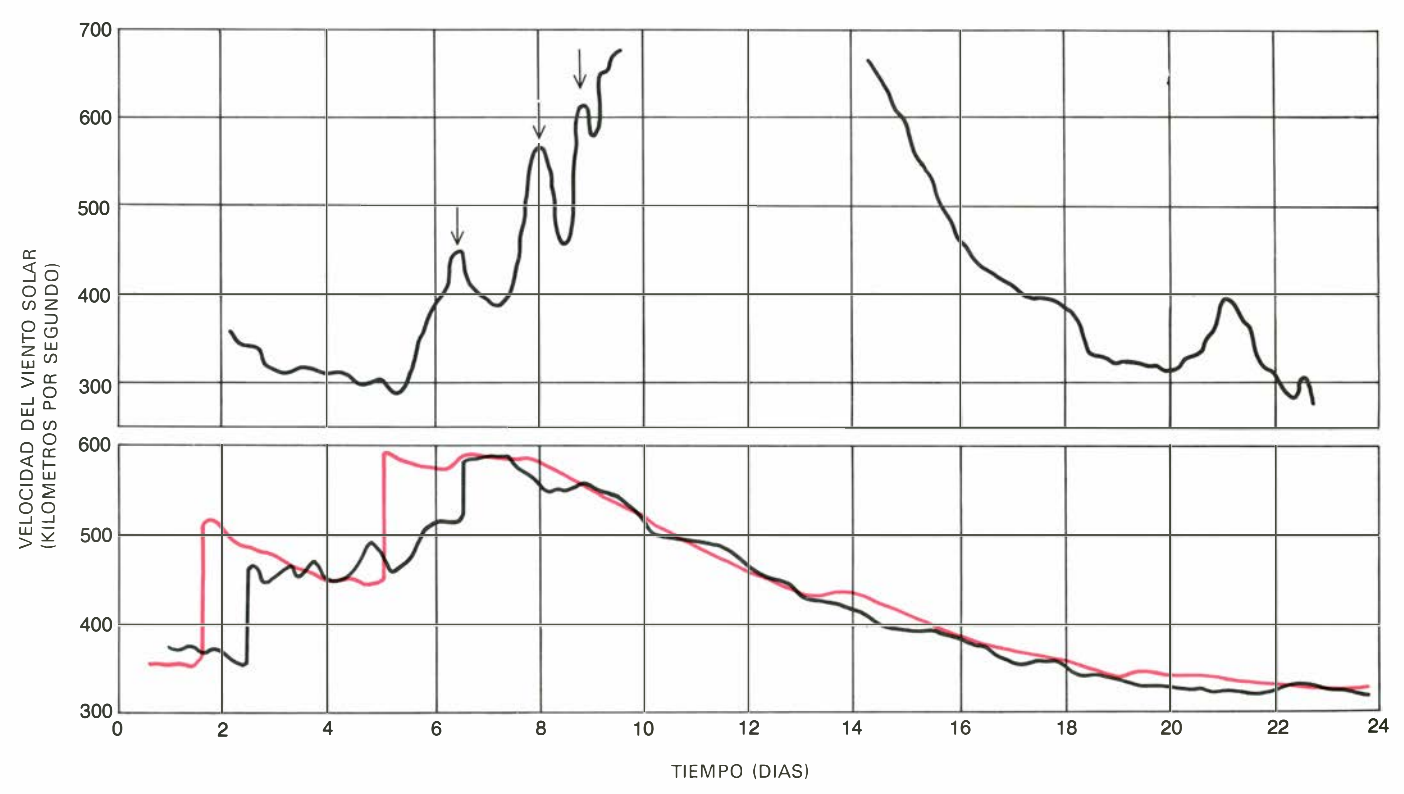
Aunque una de las ondas de choque se propaga hacia atrás desde la región de máxima presión, un observador estacionario vería que ambas ondas de choque se alejan del sol, transportadas por el movimiento del viento solar en conjunto; éste sigue siendo fuertemente supersónico y todavía supera la velocidad con la que una de las ondas de choque se propaga hacia atrás en el gas. La velocidad del sonido en el viento solar decrece con la distancia progresiva del viento al sol y la correspondiente disminución de temperatura, de modo que prácticamente todas las ondas del viento solar deben llegar a hacerse lo suficientemente abruptas como para formar la pareja de ondas de choque.

Se han desarrollado varios modelos cuantitativos para explicar cómo las ondas del viento se van haciendo cada vez más abruptas. Uno de nosotros (Hundhausen) ha ideado un modelo cuantitativo monodimensional que prescinde de algunos efectos físicos que, probablemente, se dan en el viento solar, pero que, no obstante, describe bastante bien la evolución de las ondas. Tales modelos han demostrado ser útiles para la interpretación de las observaciones de los chorros de viento solar cerca de la tierra; han suministrado también sugestivas explicaciones de por qué las variaciones de velocidad, densidad y presión del gas dentro de tales corrientes están acopladas entre sí.

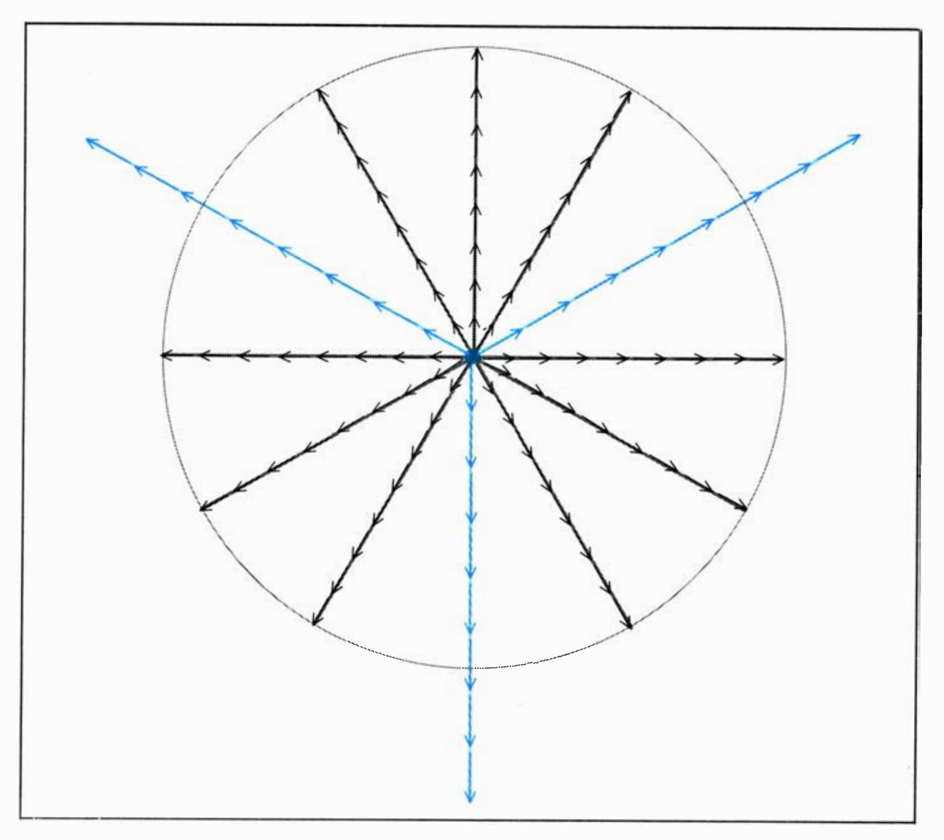
Casi todos los chorros de viento solar se han observado en un punto del espacio: cerca de la tierra. Por consiguiente, hasta hace poco, no se ha podido detectar directamente el desarrollo de las ondas del viento solar porque ello requeriría efectuar mediciones a dos distancias del sol, ampliamente separadas entre sí. Con las mediciones obtenidas sólo cerca de la tierra, el desarrollo de las ondas se pudo inferir únicamente por medio de las variaciones registradas en el viento solar asociadas a ellas. Además, casi todos los chorros de viento solar observados cerca de la tierra carecen de la estructura en doble onda de choque, porque las ondas todavía no se han hecho lo suficientemente abruptas como para que se formen las de choque. Los modelos predicen, sin embargo, que, virtualmente, todos los chorros de viento solar deben poseer ondas de choque a distancias de dos o tres unidades astronómicas del sol. (Una unidad astronó-



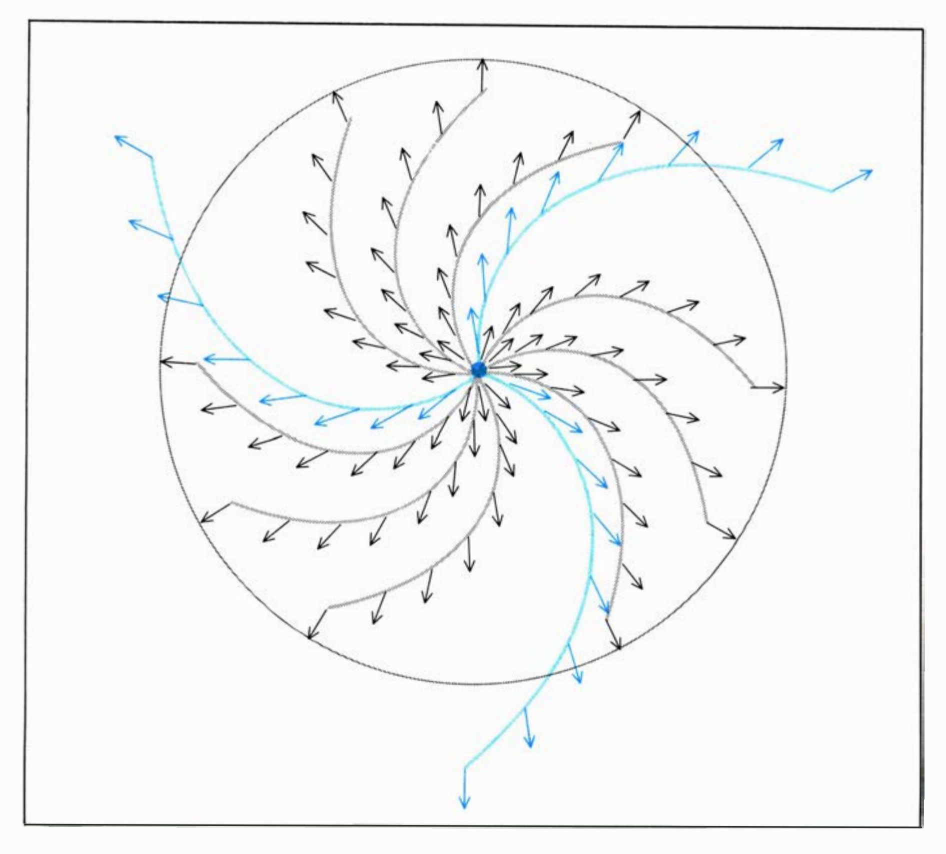
LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOLAR cerca de Júpiter fue observada cada hora *(puntos)* por el vehículo espacial *Pioneer 10* durante un periodo de 50 días en mayo y junio de 1973. Durante este tiempo, el vehículo se trasladó desde 4,03 unidades astronómicas hasta 4,23 unidades astronómicas. A esa distancia del sol, virtualmente todas las ondas de gran amplitud del viento solar se han hecho lo bastante acusadas como para presentar forma de diente de sierra. Los bruscos saltos de velocidad de la parte ascendente de cada onda de velocidad hallada representan las ondas de choque; su posición se ha destacado en esta ilustración señalándola mediante líneas verticales.



LA EVOLUCION DE UNA ONDA del viento solar a 4,7 unidades astronómicas, medidas radialmente desde el sol en dirección a la tierra, se previó a partir de la forma observada en la tierra en agosto y septiembre de 1973. La onda se observó cerca de la tierra *(arriba)* por instrumentos a bordo del *IMP 7* (séptima plataforma de vigilancia interplanetaria) en órbita alrededor de la tierra. El trozo sin datos se debió al paso del satélite a través de la magnetósfera terrestre, donde no se pueden tomar medidas directas de viento solar. A partir de las observaciones se pudo predecir, por medio de un modelo teórico, la forma de la onda a 4,7 unidades astronómicas. *(Cuadro de abajo, línea de color.)* Las mediciones de la onda realizadas allí por el *Pioneer 10* muestran que ésta se había hecho más pronunciada y había desarrollado dos ondas de choque en su borde anterior *(cuadro de abajo, línea negra)*; estos detalles se pronosticaron con razonable precisión. La amplitud total de la onda a 4,7 unidades astronómicas es mucho menor de lo que era a una unidad astronómica. Además, las fluctuaciones de breve periodo y gran amplitud *(flechas)* en la velocidad del viento solar en la parte ascendente de la onda cerca de la tierra se han amortiguado.



LAS LINEAS DE CORRIENTE del viento solar van señalando las posiciones sucesivas de todas las partículas de gas *(flechas)* que proceden de una misma región solar. Las flechas negras indican gas que viaja a 350 kilómetros por segundo; las flechas de color indican gas que viaja a 500 km por segundo. La circunferencia gris indica la posición de la órbita de la tierra. El viento solar viaja casi radialmente alejándose del sol. Si dicho astro no girase, las líneas serían rectas.



LAS LINEAS DE CORRIENTE del viento solar se curvan en el sistema solar porque el sol gira, doblando las líneas de corriente en forma de espirales. El grado de curvatura de cada línea de corriente depende de la velocidad con que el gas se aleja del sol. Donde las líneas de corriente convergen, el gas se comprime y forma un chorro de viento solar; donde divergen, se enrarece.

mica es la distancia media entre el sol y la tierra.) Los modelos predicen asimismo que la amplitud de las ondas debe decrecer muy lentamente a medida que se mueven hacia las regiones periféricas del sistema solar.

Con el lanzamiento de los vehículos espaciales *Pioneer 10* en 1972 y *Pioneer 11* en 1973, los cuales pasaron más allá de Júpiter a unas cinco unidades astronómicas del sol, se consiguió, por primera vez, someter a comprobación la tesis (y los modelos específicos) de la evolución de ondas de velocidad en el viento solar. Los primeros datos disponibles de la sonda de plasma del *Pioneer 10,* fabricada por el Centro de Investigación Ames, cuando el vehículo atravesaba el espacio interplanetario, fueron los valores horarios de la velocidad del viento. A partir de esos datos resultaba claro que, más allá de la tierra, cada chorro importante de viento solar mostraba un rápido aumento de velocidad seguido de una disminución mucho más lenta. Además, superpuestos a la porción ascendente de la onda, se registraban bruscos aumentos de velocidad cuya duración aproximada era de una hora, como cabía esperar en la hipótesis de que se debieran a ondas de choque. La estructura característica de un aumento rápido y un descenso lento en la velocidad del viento solar se puede hallar en un amplio margen de amplitudes y periodos; este aspecto de diente de sierra es, precisamente, el que deberían presentar unas ondas en evolución. No habiendo mediciones de la densidad, la presión y el campo magnético del viento solar, no se podía demostrar de forma concluyente que los bruscos saltos de velocidad en la porción ascendente de la onda, observados en los datos del *Pioneer 10,* fueran debidos a ondas de choque. Sin embargo, los datos de velocidad del viento solar concuerdan con tal interpretación, y los informes sobre las mediciones realizadas por el *Pioneer 10* de unas variaciones ulteriores del campo magnético interplanetario parecen comprobarla.

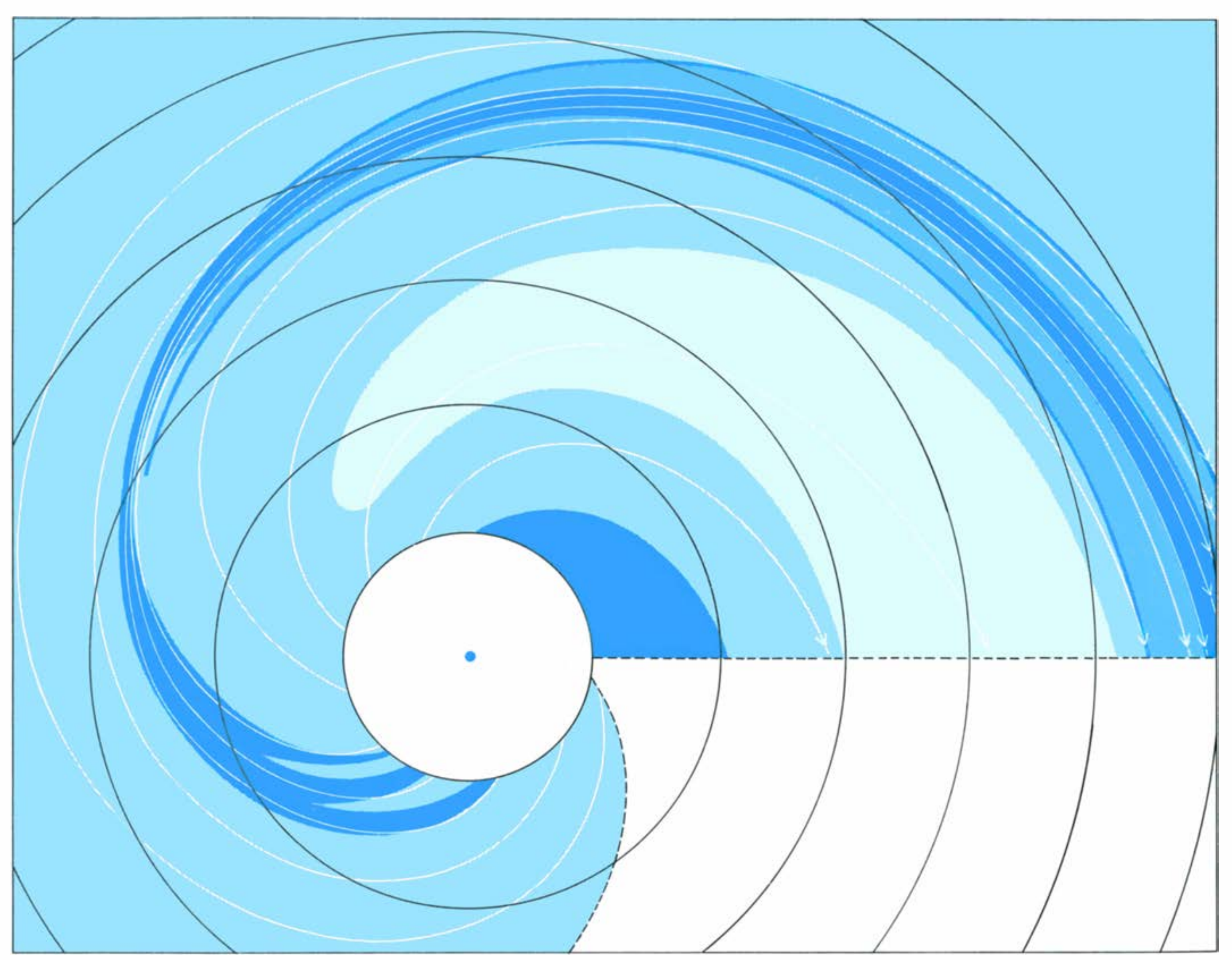
La trayectoria del *Pioneer 10* entre la tierra y Júpiter fue tal que, entre agosto y septiembre de 1973, el vehículo estuvo casi en línea con el sol y la tierra. Ese periodo de dos meses presentó una excelente oportunidad de observar directamente el crecimiento de las ondas de velocidad entre dos puntos muy distantes a lo largo de una línea casi común que se extendía radialmente desde el sol. La figura inferior de la página anterior muestra una secuencia de mediciones de la velocidad del viento solar obtenida por la sonda de plasma del Laboratorio Científico de Los Alamos, montada en

el satélite *IMP 7* (la séptima plataforma de vigilancia interplanetaria), en órbita alrededor de la tierra y otra secuencia obtenida por el *Pioneer 10* diecisiete y medio días más tarde, a una distancia de 4,7 unidades astronómicas del sol. Los dos grupos de datos han sufrido una traslación, uno respecto del otro, de suerte que el frente de la onda medido por cada vehículo espacial coincidiese si el gas que formaba el frente de onda se hubiese propagado del *IMP 7* al *Pioneer 10* a una velocidad constante.

En realidad los frentes de onda de las dos muestras no coinciden: el *Pioneer 10* detectó el comienzo de la formación de la onda tres días antes, aproximadamente. La onda llegó antes porque el gas de alta velocidad de su cresta barrió al más lento que estaba delante de él, acelerándolo según era de esperar. Además, a 4,7 unidades astronómicas del sol, la onda presentaba la forma de diente de sierra con más nitidez que en las proximidades de la tierra; cerca del frente de onda se registraban bruscos aumentos de velocidad que no se observaron cuando la onda pasó frente a la tierra. Las mediciones de la onda recogidas por el *Pioneer 10* muestran que la onda presentaba realmente el perfil que debería tener si se hubiera hecho cada vez más marcada y hubiese desarrollado un par de ondas de choque limitando la región de compresión del gas en el borde anterior.

La comparación favorable entre el modelo y las observaciones realizadas se hace más evidente si se recurre, independientemente, a las mediciones del *IMP 7* sobre la velocidad, densidad y presión del viento solar cerca de la tierra para predecir, mediante el modelo monodimensional, la estructura de la onda en la posición del *Pioneer 10*. La concordancia entre la forma prevista de la onda y la observada es muy buena, en particular por lo que se refiere al aspecto general de la onda, a la amplitud de la variación de la velocidad del gas dentro de la onda y al instante en que la onda alcanzó al *Pioneer 10*. El modelo no predijo con igual exactitud la amplitud de los bruscos aumentos de velocidad en las ondas de choque. Sin entrar en los detalles del modelo, se puede decir que su punto débil estriba, al parecer, en las hipótesis simplificadoras que deben introducirse para hacerlo susceptible de cálculo numérico en un ordenador. En particular, el modelo desprecia los efectos de las fuerzas magnéticas, la conducción del calor y el efecto de que la región de alta presión de la onda de viento solar induzca, con el tiempo, que el flujo de gas no sea radial.

Hasta ahora hemos insistido en la evolución de las ondas del viento solar a sólo una longitud heliocéntrica fija: la



CHORRO DE VIENTO SOLAR observado en el plano de la órbita de la tierra en agosto y septiembre de 1973 por el *IMP 7* y el *Pioneer 10;* se ha podido reconstruir a partir de la teoría y de las observaciones del viento solar realizadas por dichos vehículos espaciales. Las circunferencias negras indican las distancias desde el sol, que varían desde una hasta seis unidades astronómicas. Los distintos tonos de color separan líneas de igual densidad del viento solar; cada una difiere de la anterior por un factor igual a cuatro. (Las isopícnicas, o curvas de igual valor de la densidad, se han ajustado, habida cuenta del hecho de que la densidad real del gas decrece al aumentar la distancia al sol.) Las flechas blancas, curvadas y finas, representan líneas de corriente. Las curvas gruesas de trazo continuo en color representan ondas de choque. Aunque la distribución del gas en el interior de la órbita de la tierra no se conoce, se pueden ver tres ondas de compresión asociadas con las fluctuaciones de velocidad de gran amplitud y corto periodo observadas en el borde anterior de la onda principal.

línea del sol a la tierra. La evolución de una onda a lo largo de cualquier longitud, sin embargo, es sólo una parte pequeña de una configuración ondulatoria mucho mayor que se halla en evolución en todas las regiones del sistema solar. La configuración queda descrita de la manera más satisfactoria mediante líneas de corriente, es decir, líneas imaginarias que dibujan las posiciones de todas las partículas de gas originadas en un punto común en el sol, pero en momentos diferentes. Si el sol no girase, las líneas de corriente serían rectas que se extenderían radialmente hacia fuera a partir de él. La rotación del sol es causa de que las líneas de corriente en su plano ecuatorial se curven formando espirales. Cuanto más lentamente se expanden las partículas de gas, tanto más apretadamente se cierran las espirales de las líneas de corriente. En las regiones en donde las líneas de corriente convergen, se forman estrechas bandas de compresión (alta densidad), en tanto que donde las líneas de corriente divergen se forman anchas regiones de rarefacción (baja densidad). Cuando la emisión de gas desde el sol es constante con el tiempo, la configuración completa de líneas de corriente curvas gira con el sol. Vale la pena insistir en que solamente la configuración gira: cada partícula de gas del viento solar se aleja del sol casi radialmente.

De los datos del chorro de viento solar, observado en 1973 por el *IMP 7* y el *Pioneer 10*, y con la ayuda de un modelo teórico, se puede deducir el aspecto general del viento solar en el plano de la órbita terrestre tal como podía haber sido examinado por un observador estacionario situado en la vertical y a gran distancia del polo norte del sol. El chorro presentaba su máxima compresión a una distancia de unas tres unidades astronómicas del sol. En ese punto, la región comprimida contenía todas las líneas de corriente que originariamente estaban en el borde anterior de la onda. Mas allá de las tres unidades astronómicas, la región de compresión se expandía lentamente. La expansión se aceleró cuando el par de ondas de choque, directa y retrógrada, se formaron a causa de haberse propagado a partir del centro de compresión la onda, cada vez más marcada. Cerca de la órbita de Júpiter, las líneas de corriente que originariamente estaban separadas por más de 180° de longitud solar se contrajeron, quedando contenidas dentro de la región de compresión limitada por las ondas de choque. Una amplia región de rarefacción completaba el esquema.

El concepto de ondas de velocidad que se van haciendo cada vez más abruptas parece explicar los cambios observados en la estructura del viento solar entre una y cinco unidades astronómicas, aproximadamente. La estructura puede teóricamente extenderse también a las regiones más alejadas del sistema solar *(véase la ilustración de la página 17)*. Se supone que la onda de velocidad continuará haciéndose más acusada, en forma análoga, hasta más de 20 unidades astronómicas, en donde la configuración espiral comenzará a cerrarse sobre sí misma: en ese punto, la onda de choque en la cola de la siguiente revolución del chorro chocará con la onda de choque del borde anterior de la revolución inmediata anterior a ella. Hasta esa distancia y alguna desconocida más allá, la evolución de las ondas de velocidad del viento solar continuará conduciéndo a éste hacia un estado crecientemente heterogéneo: por ejemplo, a 20 unidades astronómicas, la diferencia relativa entre la densidad del gas en la región comprimida y la densidad de la región enrarecida será mayor de lo que es en la órbita de la tierra.

Se ha demostrado recientemente que las ondas de choque formadas por ondas bien acusadas del viento solar más allá de la órbita de Marte dan origen a un gran número de protones de rayos cósmicos de baja energía (entre un millón y 50 millones de electrón-voltios). Cabe la posibilidad de que casi la totalidad del flujo de protones de rayos cósmicos de baja energía detectado en la tierra sea producido por tales ondas de choque y modulado por los campos magnéticos asociados con los chorros de viento solar a grandes distancias del sol. Además, unas observaciones recientes indican que Júpiter actúa como un cañón electrónico, acelerando los electrones hasta energías del orden de un millón a 10 millones de electrón-voltios. Los electrones llenan el espacio interplanetario, pero su propagación a través del viento solar queda fuertemente afectada por los pares de ondas de choque directa y retrógrada, las cuales forman una barrera que el electrón no puede atravesar.

El estudio de la producción y la propagación de partículas energéticas en el espacio interplanetario es sólo uno de los campos de investigación para el cual importa conocer las ondas del viento solar. De hecho, la complicada naturaleza de los chorros de viento solar a grandes distancias del sol parece ejercer un notable influjo en una serie de problemas, que van desde la dinámica de la magnetósfera de los planetas exteriores a la posible interacción del viento solar con el gas interestelar.

Los receptores de los opiáceos y sustancias opiáceas endógenas

Al parecer, la morfina, sus derivados y las sustancias afines producen su efecto al unirse a receptores específicos, situados en la membrana de células del cerebro y de la médula espinal

Solomon H. Snyder

En 1680, el médico inglés Thomas Sydenham escribía: "De entre los remedios que a Dios Todopoderoso le ha complacido dar al hombre para aliviar sus sufrimientos, no hay ninguno que sea tan universal y tan eficaz como el opio". En el curso de los siglos transcurridos, la admiración de la clase médica ante los efectos analgésicos del opio y de sus derivados se ha moderado, al conocerse su toxicidad y su capacidad para producir toxicomanía. El conocimiento de dichas propiedades indeseables, como también la total carencia de otros tipos de drogas conocidas que ejercieran una acción analgésica de potencia igual a la de los compuestos opiáceos, estimularon una intensa investigación a fin de descubrir opiáceos sintéticos que tuvieran las propiedades positivas de la morfina, pero carecieran de las negativas. En un período más reciente, se han encontrado en el cerebro sustancias naturales similares a la morfina. Estas sustancias prometen abrir nuevos horizontes para el conocimiento del lugar preciso del organismo en que actúan los opiáceos, de la forma en que lo hacen y de la causa de su capacidad para producir toxicomanía.

El opio se ha venido usando como droga desde la Grecia clásica, por lo menos; y ello, no sólo porque alivia el dolor sino también porque produce euforia. El término deriva de la palabra griega *opion*, que significa zumo de adormidera; la droga se halla en el exudado lechoso obtenido por incisión de las cápsulas de la adormidera *Papaver somniferum*, cuando aún están verdes. En 1803, un joven farmacéutico alemán, Friedrich Sertürner, aisló del opio un alcaloide al que llamó morfina, en honor de Morfeo, dios griego del sueño; a mediados del siglo XIX, se había extendido ya ampliamente la utilización de morfina pura, en substitución de los preparados crudos de opio. Se tuvo clara conciencia de la toxicidad de la morfina y de su capacidad para ocasionar toxicomanía cuando la droga se había convertido ya en un instrumento establecido de la medicina clínica. La administración de opiáceos a los soldados heridos en la guerra civil de los Estados Unidos transformó el enviciamiento producido por dichas drogas en un problema social de gran importancia en dicho país y aceleró la búsqueda de opiáceos sintéticos que no ocasionasen la toxicomanía.

Resulta frustrante que, hasta ayer, el objetivo de un opiáceo no enviciante haya permanecido inalcanzable. Una y otra vez, la clase médica acogía con entusiasmo el descubrimiento de un opiáceo –que se suponía no enviciante– para desengañarse más tarde, cuando había estado tomando la droga un número de pacientes suficiente durante un largo período y el resultado había sido la producción de toxicomanía que, en algunos casos, resultaba incluso mayor que la inducida por la morfina. Por ejemplo, hacia 1890, la compañía Bayer introdujo la heroína, un derivado de la morfina con dos grupos acetilo adicionales ($COCH_3$), como analgésico teóricamente no enviciante. De una forma similar, hacia 1940, la meperidina (Demerol) se convirtió en el analgésico opiáceo más popular de la práctica médica estadounidense, porque se pensaba que no producía toxicomanía. Muy pronto, el Bureau of Narcotics se convenció de lo contrario, dado el creciente número de adictos al Demerol. De hecho, hasta hace relativamente poco, parecían estar inextricablemente ligados los efectos analgésicos de los compuestos opiáceos a su capacidad para producir toxicomanía o enviciamiento.

Las drogas, las hormonas y los neurotransmisores (sustancias químicas liberadas por los terminales nerviosos y moduladoras de la producción de impulsos en otras células nerviosas, o neuronas) producen sus efectos altamente selectivos a concentraciones muy bajas. En general, se supone que actúan en unos lugares receptores específicos, que consisten en grandes moléculas y que se hallan localizados en la superficie externa de células de los órganos destinatarios. En el caso de los opiáceos, existen diversas pruebas que apoyan el concepto de receptor.

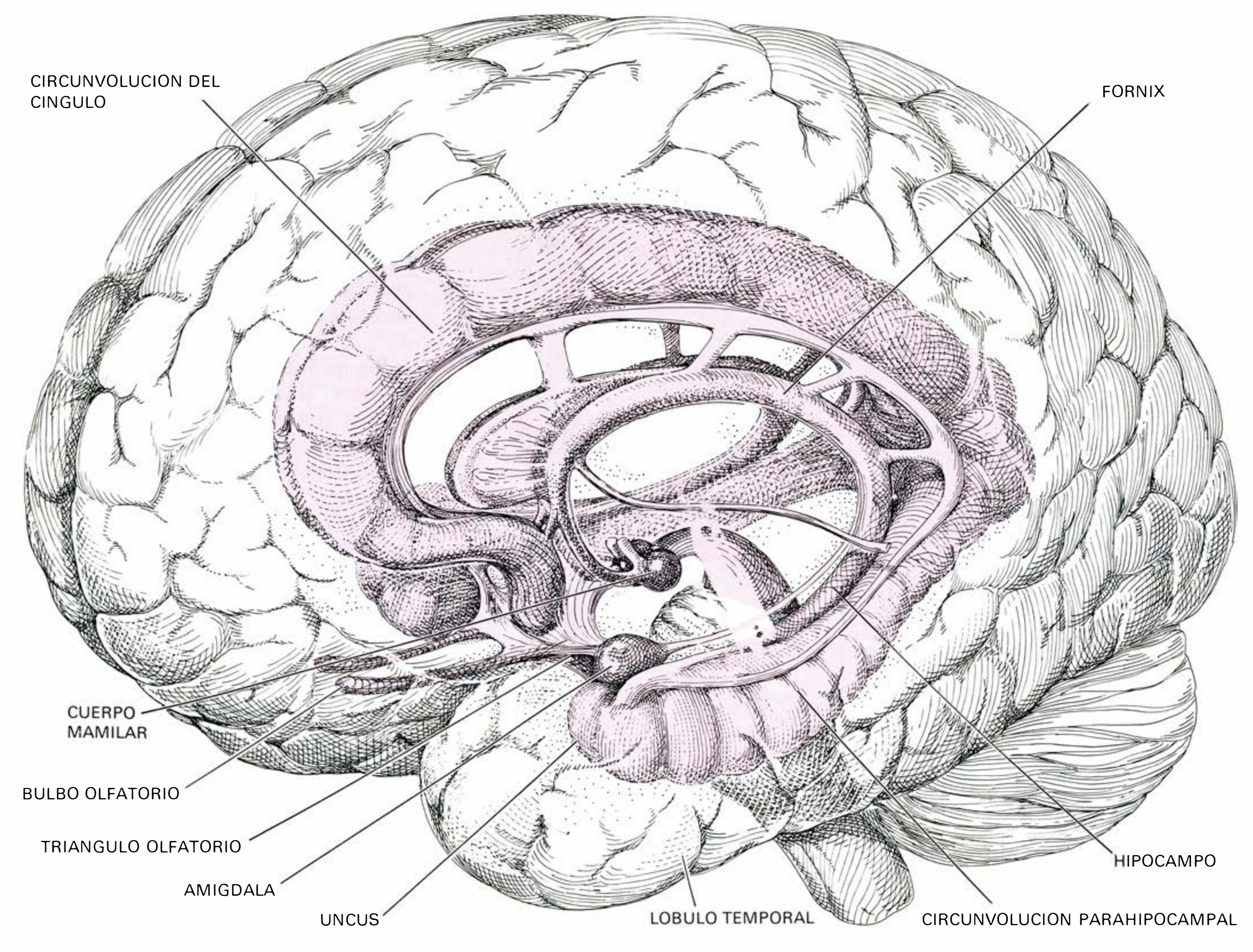
En primer lugar, todos los opiáceos activadores, es decir, todas las sustancias activas en la producción de analgesia, presentan semejanzas básicas en su estructura molecular. La morfina y la mayoría de los demás opiáceos ofrecen una estructura rígida en *T* con dos anchas superficies hidrófobas formando un ángulo recto entre sí, un grupo hidroxilo (OH) capaz de formar enlaces de hidrógeno y un átomo de nitrógeno con carga positiva, que puede formar un enlace iónico; en conjunto, todo ello sugiere la posibilidad de unas interacciones no covalentes con un lado de unión receptor geométrica y químicamente complementario. Se han obtenido, además, activadores opiáceos sintéticos, que son considerablemente más potentes que los activadores naturales, aunque su estructura básica sea similar. Pongamos por caso a la etorfina, que es de 5000 a 10.000 veces más potente que la morfina. Con dosis muy bajas, del orden de 0,0001 gramos, produce euforia y alivia el dolor, siendo por tanto más activa que el LSD, que suele citarse como la sustan-

cia más potente de las capaces de alterar la mente. Con toda seguridad, para que una droga actúe a dosis tan pequeñas, ha de "buscar" lugares receptores altamente selectivos.

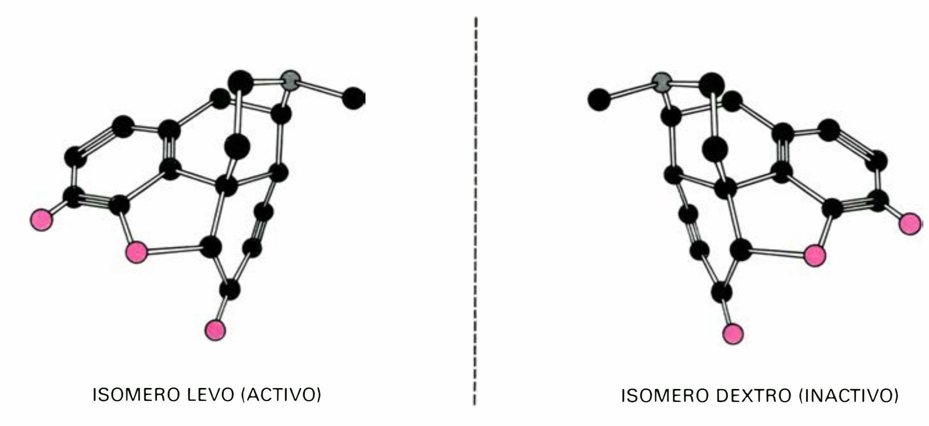
En segundo lugar, la mayoría de los opiáceos existen en forma de dos isómeros ópticos: moléculas idénticas en cuanto a su composición química, pero que son imágenes especulares una de la otra, es decir, que no se pueden superponer en el espacio, al igual que ocurre con la mano derecha y la izquierda. Los isómeros ópticos pueden distinguirse entre sí por la dirección en que queda girado el plano de polarización de la luz de un rayo polarizado que atraviesa una solución del isómero. En general, tan sólo el isómero levorrotatorio, es decir, el que hace girar el plano de polarización de la luz hacia la izquierda, puede aliviar el dolor, provocar euforia o cualquier otra acción asociada a los compuestos opiáceos. Esta estereoespecificidad de su acción apoya el modelo de un receptor altamente específico que pueda distinguir la configuración óptica de la molécula opiácea en cuestión.

En tercer lugar, ciertas modificaciones moleculares ligeras pueden transformar a los activadores opiáceos en inhibidores, es decir, en sustancias que bloquean de forma específica las acciones analgésicas y eufóricas de los activadores, sin provocar, por sí mismas, ninguno de dichos efectos. Por ejemplo, la sustitución del grupo metilo (CH_3) del nitrógeno de la morfina por un grupo alilo (CH_2-$CH=CH_2$) la convierte en nalorfina, que es un potente inhibidor que bloquea todos los efectos farmacológicos de la morfina. Se puede hacer revivir de forma casi instantánea a un animal o a una persona que esté a punto de morir a consecuencia de un envenenamiento por morfina, suministrándole cantidades de nalorfina mucho menores que las de morfina tomadas. El que este efecto sea tan rápido implica que el lugar de acción es común. Parece como si los inhibidores ocuparan los lugares receptores de opiáceos, sin hacer otra cosa salvo bloquearles el acceso a los activadores opiáceos.

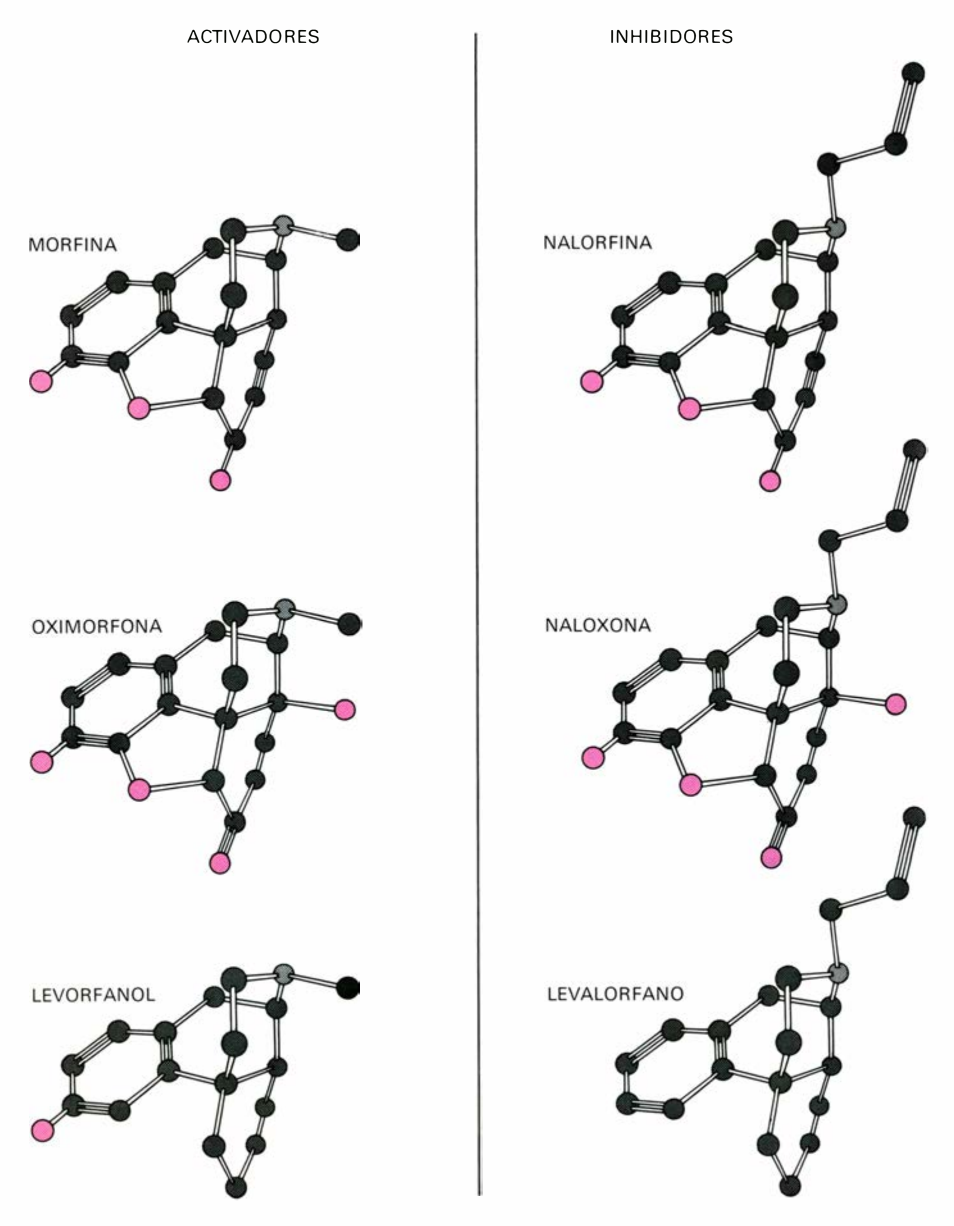
Por todas estas razones, hacía tiempo que los farmacólogos suponían que existían receptores específicos de opiáceos en el cerebro y, posiblemente, también en otros tejidos. Tras sintetizar una serie entera de derivados de la morfina y probar sus efectos farmacológicos en animales, los investigadores empezaron a formarse una idea de cuáles eran las partes de la molécula opiácea responsables de determinados efectos fisiológicos. Durante dicho proceso, se fue dilucidando cómo podría ser la forma física del supuesto receptor opiáceo, pero no se llegó



UNOS RECEPTORES OPIACEOS (localizados en el cerebro) quedaron al descubierto al medir la unión específica entre drogas opiáceas radiactivas y fragmentos de células procedentes de distintas regiones cerebrales. Se encontró una mayor densidad de uniones en las células del sistema límbico *(en color)*, que es un conjunto de regiones primitivas desde el punto de vista evolutivo, situado en el centro del cerebro y cuya función primaria está relacionada con el olfato en los vertebrados inferiores y con la aparición de las emociones en el hombre. La elevada concentración de receptores en el sistema límbico sugiere que allí es donde los compuestos opiáceos ejercen sus acciones inductoras de euforia, y manifiesta también que podría haber uno o más opiáceos endógenos que influyesen en la modificación del componente emocional del dolor.



LOS ISOMEROS OPTICOS de la droga opiácea analgésica (antidolorosa) llamada morfina, es decir, sus formas moleculares que son imágenes especulares una respecto de la otra, tienen actividades farmacológicas muy distintas. Los efectos analgésicos característicos de la droga sólo son producidos por el isómero levorrotatorio *(levo)*, que hace girar hacia la izquierda el plano de la luz polarizada, cuando está disuelto; el isómero dextrorrotatorio es totalmente inactivo. Esta estereoespecificidad de la acción opiácea apoya la idea de un receptor capacitado para distinguir la configuración óptica de la molécula. El carbono, en negro, el nitrógeno en gris y el oxígeno en color.



LIGERAS MODIFICACIONES QUIMICAS en la estructura de la molécula de los analgésicos opiáceos (que también se llaman activadores), tales como la sustitución de un grupo metilo (CH_3) por un grupo alilo (CH_2–$CH=CH_2$), son suficientes para convertirlos en inhibidores, que bloquean los efectos analgésicos de los activadores, incluso cuando están presentes en pequeñas dosis. El mecanismo de acción de los inhibidores estriba, al parecer, en la unión a una forma inactiva del receptor.

a conseguir una identificación inequívoca del propio receptor.

El mayor obstáculo en la identificación y estudio del receptor radicaba en que los opiáceos, como la mayoría de los demás compuestos, se unían a casi todas las membranas, fueran o no biológicas. De este modo, la unión no específica, es decir, la unión no asociada al receptor, resultaba cuantitativamente muy superior a la unión con el receptor, no pudiéndose ni siquiera detectar ésta. Avram Goldstein y sus colaboradores, en la Stanford University School of Medicine, intentaron diferenciar la unión específica de los opiáceos de la no específica, en fragmentos de membrana procedentes de células de cerebro homogeneizadas, aplicando el criterio de la estereoespecificidad; compararon, pues, la capacidad que tenía el isómero óptico farmacológicamente activo para inhibir la unión de un compuesto opiáceo marcado con radiactividad con la misma capacidad del isómero óptico inactivo. Aunque la técnica constituyó un adelanto importante, Goldstein y sus colaboradores se encontraron con que, en el tubo de ensayo, se realizaban de forma estereoespecífica sólo un 2 por ciento de las uniones de opiáceos con membrana de célula de cerebro. Este resultado fue desalentador, toda vez que pretender aislar la escasa cantidad de uniones específicas con el presunto receptor, respecto de la grandísima cantidad de uniones no específicas, resultaba una tarea casi imposible.

En mi laboratorio de la Johns Hopkins University School of Medicine, Candace B. Pert (un doctorando a la sazón) y yo pensamos que quizás unas manipulaciones técnicas sencillas podrían amplificar la unión específica con el receptor lo suficiente como para que se pudiera medir. Para lograrlo, nos servimos de una metodología iniciada por Pedro Cuatrecasas, de la Johns Hopkins, para la identificación del receptor de la hormona insulina. Cuatrecasas había conseguido detectar la unión específica, haciendo que la hormona marcada fuese muy radiactiva, a fin de poder aplicarla en concentraciones muy bajas a fragmentos de membrana de célula destinataria, apoyados sobre filtros. La hormona tenía una gran afinidad por el lugar receptor, lo que significaba que, al aplicarla a bajas concentraciones, se privilegiaría la unión específica sobre la no específica. Cuatrecasas lavó los fragmentos de membrana exhaustivamente, pero inmediatamente después de la unión de la hormona, para eliminar de una forma selectiva las moléculas que estuvieran unidas de forma no específica. Estas técnicas

nos permitieron identificar lados de unión para los cuales los opiáceos eran muy afines, en fragmentos de membrana celular de cerebro de rata y de intestino de cobaya, con la ayuda de naloxona marcada con radiactividad, que es un inhibidor opiáceo de gran potencia. A fin de estudiar la especificidad de la unión de los compuestos opiáceos, comparamos la capacidad de los isómeros ópticos activo e inactivo para competir por el lugar de unión del receptor con moléculas de naloxona marcadas. Comprobamos que los isómeros activos, tanto de los activadores como de los inhibidores, podían desplazar a la naloxona que ya estaba unida a la membrana, y que los isómeros farmacológicamente inactivos tenían un efecto prácticamente nulo sobre dicha unión.

Sin embargo, el solo hecho de la unión estereoespecífica no es suficiente para establecer una asociación entre un opiáceo y un receptor. Podría ser que algunos constituyentes del tejido cerebral, ordenados de forma simétrica a los opiáceos, pero distintos de los receptores, discriminaran entre sus dos isómeros. Horace H. Loh, de la University of California School of Medicine, en San Francisco, ha descubierto que cierto tipo importante de lípidos (sustancias grasas) del cerebro puede discriminar entre los isómeros ópticos de los opiáceos. En mi propio laboratorio, Gavril W. Pasternak ha comprobado que los opiáceos se unen estereoespecíficamente incluso a algunos filtros de fibra de vidrio.

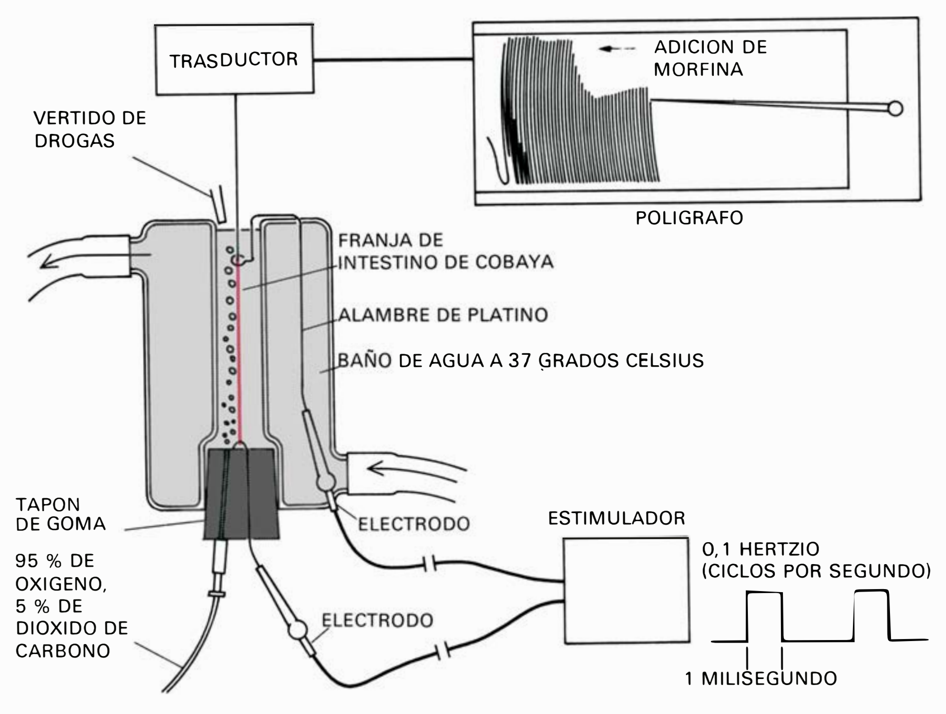
Para asegurarnos de que las uniones que habíamos observado en fragmentos de cerebro homogeneizado representaban las interacciones opiáceo-receptor que se dan en la vida real, pusimos a prueba muchas drogas para determinar si su afinidad por el receptor reflejaba fielmente su actividad farmacológica. Y así resultó, efectivamente: los opiáceos potentes, como el levorfanol y la morfina, tienen una afinidad por el receptor mucho mayor que los opiáceos débiles, como la meperidina y el propoxifeno (Darvon).

También las mismas discrepancias aparentes sirven como excepciones que confirman la regla. Por ejemplo, la etorfina, un analgésico que es unas 6000 veces más potente que la morfina, tiene una afinidad por el receptor que sólo supera en unas 20 veces la afinidad de la morfina. Sin embargo, la etorfina es 300 veces más soluble en los lípidos y, por tanto, más eficaz a la hora de penetrar en el cerebro a partir de la sangre. La combinación de una afinidad 20 veces mayor y de una penetración 300 veces mayor permite explicar que la potencia de la etorfina sea 6000 veces mayor.

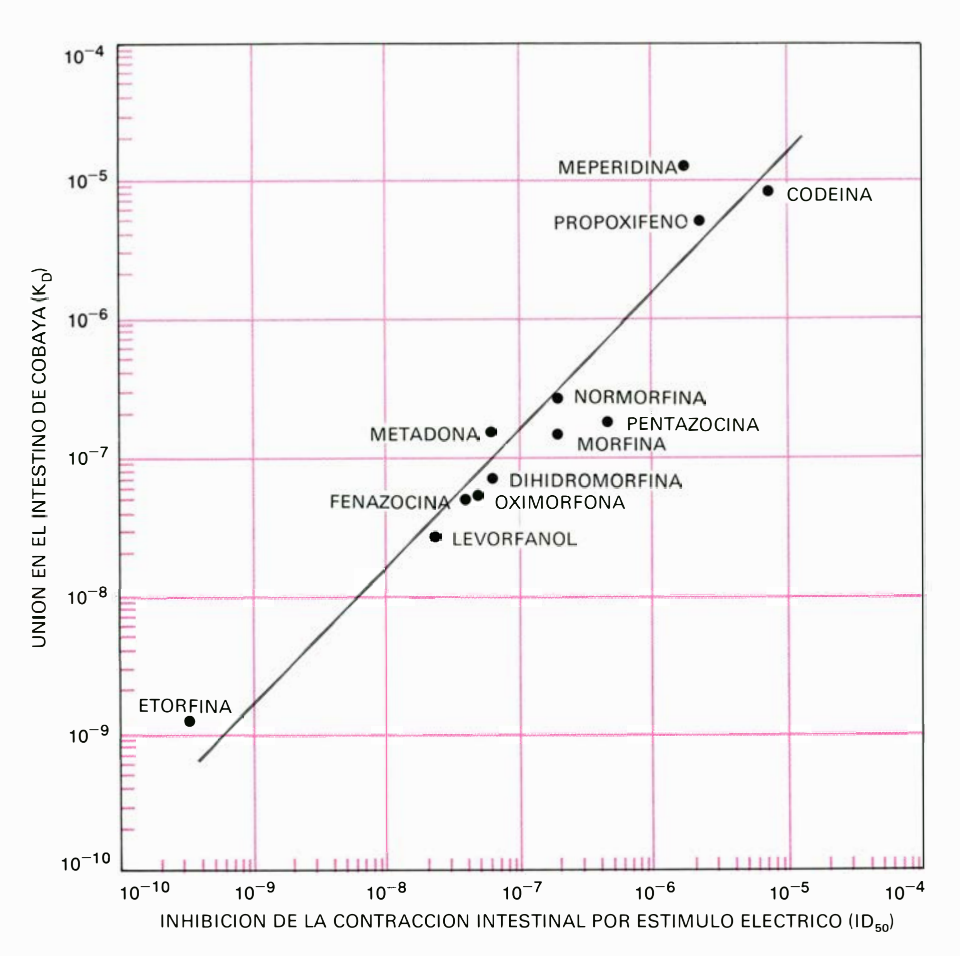
Del mismo modo, la codeína, que es un compuesto opiáceo que se usa ampliamente para aliviar el dolor, calmar la tos y eliminar la diarrea, tiene una potencia de aproximadamente el 20 por ciento de la de la morfina en el hombre, pero la potencia de su unión con el receptor opiáceo es cuantitativamente mucho menor que la que posee la morfina, a saber, un uno por mil de la de ésta. Tal discrepancia se explica fácilmente por el hecho de que la codeína es transformada en morfina por enzimas del hígado, y así resulta que es la morfina la que penetra en el cerebro y provoca los efectos farmacológicos que se atribuyen a la codeína. E. Leong Way, de la University of California School of Medicine, en San Francisco, ha demostrado que, aunque la codeína puede aliviar el dolor con relativa eficacia en las ratas si se inyecta por vía intravenosa, no posee actividad analgésica si se inyecta directamente en el cerebro. En cambio, la morfina se muestra activa en el último caso.

Lo ideal sería comparar la potencia analgésica y la unión con el receptor en el mismo sistema. Esto ha sido posible en el caso de los opiáceos, porque se sabe que su actividad analgésica se refleja fielmente por su capacidad para inhibir contracciones del intestino de cobaya, inducidas por estímulos eléctricos. Además, la afinidad por los lados de unión de los receptores es muy similar en el intestino de cobaya y en el cerebro, se trate de activadores o de inhibidores. Trabajando en mi laboratorio, Ian Creese aplicó un sistema de determinación sencillo y midió la capacidad de distintos opiáceos para inhibir la contracción del intestino de cobaya; la comparó luego con su capacidad para inhibir la unión de la naloxona en el mismo tejido. Observó que, en el intestino de cobaya, la afinidad por el receptor y la potencia farmacológica estaban correlacionadas de forma asombrosa, para los activadores y para los inhibidores; ello sugería que el lado de unión estereoespecífica era realmente un receptor auténtico.

Pero seguía habiendo una fuente importante de problemas; en los experimentos de unión *in vitro*, los inhibidores y sus correspondientes activadores parecían presentar la misma afinidad por el receptor. Sin embargo, se sabía con certeza que, en los organismos vivos, los inhibidores eran mucho más potentes que los activadores opiáceos. La paradoja se resolvió cuando modificamos levemente la técnica empleada para medir el receptor. Las condiciones en las que habíamos llevado a cabo nuestros primeros experimentos no eran naturales, por cuanto carecían de todos los iones que se encuentran en abundancia en el organismo, en particular el ion sodio. Tan pron-



ESTE APARATO PARA BIOENSAYO, destinado a la determinación de la potencia farmacológica de las drogas opiáceas, fue montado en el laboratorio de José M. Musacchio, en el New York University Medical Center. Se utiliza una franja de íleon (parte del intestino) de cobaya, tejido en el que se sabe que hay receptores opiáceos parecidos a los del cerebro; mediante un trasductor, se conecta esta franja a un polígrafo que registra sus contracciones. La potencia de los activadores opiáceos se mide por su eficacia en inhibir las contracciones del músculo liso intestinal.



LA ESTRECHA CORRELACION que existe entre la potencia farmacológica de los activadores opiáceos en el intestino de cobaya y su afinidad por el receptor opiáceo en el mismo tejido demuestra que el receptor es auténtico. Aquí se representa el ID_{50} de varios compuestos opiáceos (es decir, la concentración necesaria para inhibir en un 50 por ciento la contracción intestinal inducida por un estímulo eléctrico) frente a la K_D de estas drogas (es decir, la concentración que resultaría ser necesaria para inhibir en un cincuenta por ciento la unión estereoespecífica de naloxona radiactiva).

to como incorporamos sodio en nuestro procedimiento, aparecieron diferencias asombrosas en el comportamiento de los activadores y de los inhibidores. A las concentraciones en que se encuentra normalmente en el organismo, el sodio favorecía la unión de los inhibidores opiáceos y disminuía mucho la unión de los activadores. Estos efectos eran específicos del sodio. El litio, con un radio atómico del mismo orden, tenía efectos algo similares, pero no así otros iones dotados de carga positiva como el potasio, el rubidio y el cesio.

A fin de poder evaluar una amplia gama de opiáceos, medimos hasta qué punto el sodio podía alterar la capacidad de una determinada droga para inhibir la unión de la naloxona con el receptor opiáceo. Nuestro "índice de sodio" representa la relación entre la concentración de droga necesaria para inhibir la unión de la naloxona en un 50 por ciento en presencia de sodio y la concentración de droga necesaria en ausencia de sodio. Cuanto mayor es el número, mayor es el efecto del sodio en la disminución de la capacidad de la droga para inhibir la unión de la naloxona. En otras palabras, un índice de sodio de 2 significa que la capacidad de una droga para unirse con el receptor (medida por la inhibición que ejerce sobre la unión de la naloxona) se reduce a la mitad en presencia de sodio.

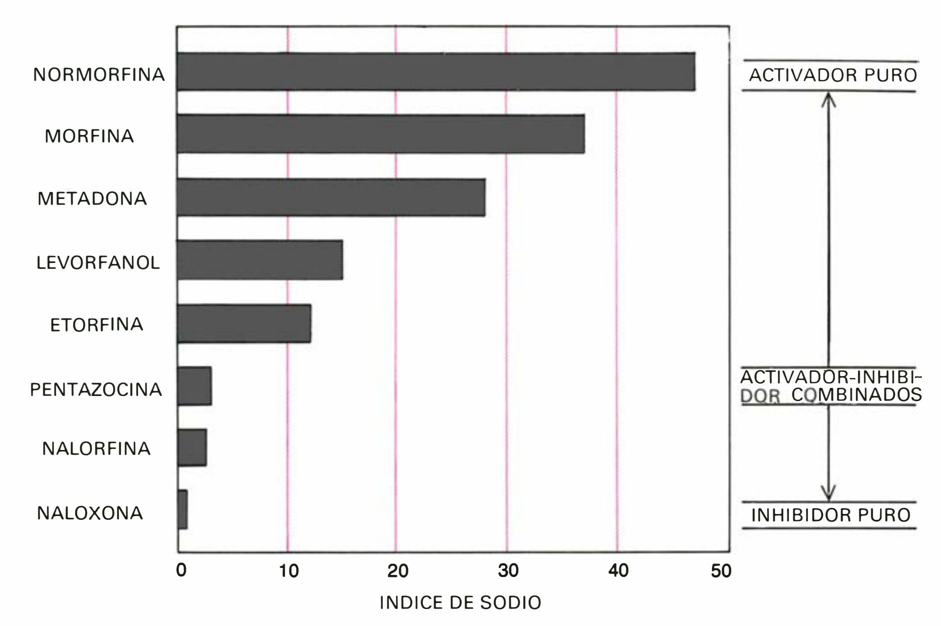
Mediante el índice de sodio se puede predecir, con bastante precisión, el grado de poder activador o inhibidor de una droga opiácea. Los inhibidores opiáceos puros, como la naloxona y la naltrexona, tienen un índice de sodio menor o igual a 1, lo que significa que el sodio no disminuye su capacidad para unirse al receptor opiáceo y, de hecho, la aumenta a veces. Otros inhibidores opiáceos están ligeramente "contaminados" por una capacidad activadora. Este tipo de drogas puede aliviar el dolor, pero, debido sin duda a sus propiedades inhibidoras, al parecer no produce toxicomanía tan fácilmente como los activadores opiáceos "puros". Sin embargo, las primeras drogas con esta mezcla de propiedades activadoras e inhibidoras no se utilizaron en medicina clínica porque tenían algunos efectos secundarios negativos: producían ansiedad, agitación y, en ocasiones, alucinaciones. El mejor ejemplo de este tipo de drogas es la nalorfina, que se ha venido usando en clínica durante muchos años para tratar los casos de dosis excesivas de morfina o heroína. Tiene un índice de sodio de aproximadamente 2,5; ello significa que su unión con el receptor se hace de dos a tres veces más débil en presencia de sodio. En el otro extremo del espectro tenemos a los activadores opiáceos puros, que no poseen propiedades inhibidoras; éstos se tornan de 12 a 60 veces más débiles en presencia de sodio. No está claro cuál es la causa exacta de la variabilidad de los índices de sodio de los activadores. Ninguno de ellos tiene propiedades inhibidoras manifiestas, pero quizá varíen en la pureza de sus propiedades activadoras. Un activador más puro podría ser un analgésico más efectivo, pero tal vez podía desencadenar una toxicomanía con mayor eficacia.

Las drogas más interesantes son las que presentan índices de sodio entre 3 y 7. Son drogas de propiedades activadoras-inhibidoras combinadas y prometen muchísimo como analgésicos no generadores de toxicomanía. La mayoría de estos analgésicos relativamente no enviciantes pertenece a la moderna clase de compuestos conocidos como benzomorfanos, que fueron elaborados por Everette L. May, del National Institute of Arthritis, Metabolism and Digestive Diseases, y por otros investigadores. Su prototipo es la pentazocina (Talwin), de gran difusión en los Estados Unidos; se trata del único analgésico opiáceo potente que no está sometido a la estricta regulación sobre "drogas peligrosas". Debido, probablemente, a que sus propiedades inhibidoras equilibran a las activadoras, la pentazocina no es detectada en la prueba de la placa caliente, que es un procedimiento de detección tradicional en farmacología; consiste en colocar, sobre una placa eléctrica caliente, ratones tratados con la droga y medir el efecto analgésico de ésta en razón del tiempo que tardan en saltar fuera de la placa. A pesar de ello, en el hombre la pentazocina es un analgésico activo; por último, se demostró que alivia el dolor, en otras pruebas con animales. En muchas especies, resulta difícil detectar el desarrollo de tolerancia a la pentazocina y dependencia física de esta droga. En el hombre, la droga tiene una probabilidad mucho menor de producir toxicomanía que otros opiáceos, aunque se han registrado algunos casos.

Los laboratorios farmacéuticos han encontrado grandes dificultades a la hora de fabricar tales drogas analgésicas activadoras-inhibidoras combinadas, dadas sus peculiares propiedades farmacológicas. No existe ningún ingenio químico que garantice con claridad que los productos tengan las propiedades deseables. Ni siquiera se puede confiar en que la capacidad de una droga determinada para producir toxicomanía será todo lo "despreciable" que se desea, hasta que no se haya experimentado en el hombre, lo cual implica un gasto considerable. El procedimiento se simplifica mucho midiendo la unión de la droga al receptor opiáceo, en fragmentos de células de cerebro, en presencia y en ausencia de sodio. Sólo se precisa cantidades del orden de unos miligramos, mientras que, en las pruebas con animales, hay que sintetizar muchos gramos del compuesto para poder administrarlo. Hasta ahora, el sencillo ensayo opiáceo-receptor ha podido predecir el potencial clínico de los analgésicos activadores-inhibidores con una eficacia igual que la de los procedimientos de detección, más costosos, que se realizan en monos y en humanos.

El efecto selectivo del sodio sobre la unión del opiáceo con el receptor parece ser una característica de la función receptora. Se cree que la presencia del ion aumenta el número de receptores inhibidores y disminuye el número de receptores activadores. Pero, dado que existe una gran semejanza química entre los activadores y los inhibidores opiáceos, parece más razonable postular que ambas drogas se unen al mismo receptor y que puede variar el lado de unión del opiáceo conforme el receptor va oscilando entre una y otra de las dos conformaciones moleculares diferentes. El sodio, que es responsable de la transición entre ambos estados, difiere de los opiáceos por su estructura; se supone, por tanto, que actúa en un lugar distinto de la molécula receptora. En nuestro modelo, la unión del sodio fijaría al receptor en su conformación inhibidora, por la cual la afinidad de los inhibidores es alta y la de los activadores baja. Siguiendo el mismo razonamiento, los activadores tendrían una afinidad considerable por la forma activadora, "carente de sodio", del receptor, mientras que los inhibidores no la tendrían. Los activadores-inhibidores combinados poseerían afinidades intermedias para con ambas formas.

Sólo se observarían los efectos típicos de la morfina, tales como la analgesia y la euforia, cuando las drogas se unieran al estado activador del receptor,



LA PRESENCIA DE IONES SODIO reduce drásticamente la afinidad del receptor opiáceo por los activadores, sin alterar su afinidad por los inhibidores. Las franjas indican la relación que existe entre la concentración de la droga necesaria para inhibir en un 50 por ciento la unión con el receptor de naloxona, marcada con radiactividad, en presencia de sodio, y la concentración de la droga necesaria en ausencia de sodio. Los valores más bajos muestran una menor reducción de la potencia en presencia de sodio: los inhibidores "puros" tienen un índice de sodio igual o menor que 1, mientras que los activadores "puros" tienen valores altos. Por consiguiente, el índice de sodio de una droga opiácea nueva es un buen indicador de cuáles son sus propiedades activadoras o inhibidoras.

condición que nos proporciona un mecanismo molecular sencillo para explicar la actividad inhibidora opiácea. Al combinarse con el receptor en su estado de unión con el sodio, los inhibidores opiáceos reducen el número de receptores capaces de intervenir en la producción de los efectos de la morfina. Puesto que el líquido que baña a las membranas celulares en el cerebro es rico en sodio, es de esperar que el receptor opiáceo se encuentre normalmente en el estado inhibidor y de unión con el sodio. Esto concuerda con el hecho de que, en los seres vivos, los inhibidores tienen una potencia muy superior a la de los activadores. Y se puede predecir que, en un medio carente de sodio, los activadores e inhibidores opiáceos serán igualmente potentes.

Con un ensayo sencillo, sensible y específico para el receptor opiáceo, pu-

ACTIVADOR-INHIBIDOR COMBINADOS

INHIBIDOR

ACTIVADOR

SODIO

RECEPTOR OPIACEO EN SU CONFORMACION DE UNION CON EL SODIO

RECEPTOR OPIACEO EN SU CONFORMACION CARENTE DE SODIO

LITIO

SODIO

POTASIO

RUBIDIO

CESIO

EL MODELO DEL RECEPTOR OPIACEO propuesto por el autor explica el efecto del sodio, postulando que el receptor puede estar en dos conformaciones diferentes: una forma de unión con el sodio, a la que son muy afines los inhibidores, y otra forma carente de sodio, a la que son muy afines los activadores. El efecto del sodio es selectivo; de los demás iones con carga positiva, el litio es el único que tiene un efecto similar (como se ilustra, en color, y a la izquierda del grabado inferior).

ACTIVADOR POTENTE	FENAZOCINA
ACTIVADOR	MORFINA
ACTIVADOR DEBIL	METADONA
ACTIVADOR-INHIBIDOR COMBINADOS	PENTAZOCINA
INHIBIDOR CONTAMINADO CON ALGO DE CAPACIDAD ACTIVADORA	NALORFINA
INHIBIDOR PURO	NALOXONA

LOS PROTOTIPOS de drogas opiáceas que se muestran aquí sugieren la posibilidad de que haya una relación entre la estructura molecular y la actividad farmacológica. El anillo bencénico *A* y el atómo de nitrógeno *(en gris)* son universales y, al parecer, cruciales para producir todos los efectos de los compuestos opiáceos, tanto si el receptor está en la conformación activadora como si está en la inhibidora. Además, la forma activadora parece presentar un lugar de unión específico para el anillo *F* de los activadores potentes, como la fenazocina, unión que estabiliza al receptor en la conformación activadora. La potencia de la morfina es sólo moderada porque carece del anillo *F*. La metadona posee los anillos *A* y *F*, pero es un activador débil porque no consigue presentar la orientación crítica de los dos anillos, necesaria para una unión fuerte con la forma activadora del receptor. Al parecer, la cadena lateral de los inhibidores se une a un lugar especial de la forma inhibidora del receptor. En los activadores-inhibidores combinados, como la nalorfina o la pentazocina, esta cadena es flexible y posee un giro libre, de forma que, en cualquier momento determinado, hay moléculas en la forma inhibidora y otras que no lo están. En los inhibidores "puros", como la naloxona, la presencia de un grupo hidroxilo (OH) adyacente reduce la libre rotación de la cadena lateral, fijando, por tanto, a la cadena en la posición espacial característica de la inhibidora.

dimos plantear numerosas cuestiones. Existen muchas funciones cerebrales y sistemas neurotransmisores distribuidos por todo el cerebro. Si la distribución del receptor opiáceo reflejara la distribución de alguna propiedad específica del cerebro, dicha propiedad podría estar implicada en los efectos de los compuestos opiáceos. Dado que estos compuestos producen analgesia, lógicamente la sospecha recaía sobre las estructuras cerebrales responsables de la percepción del dolor.

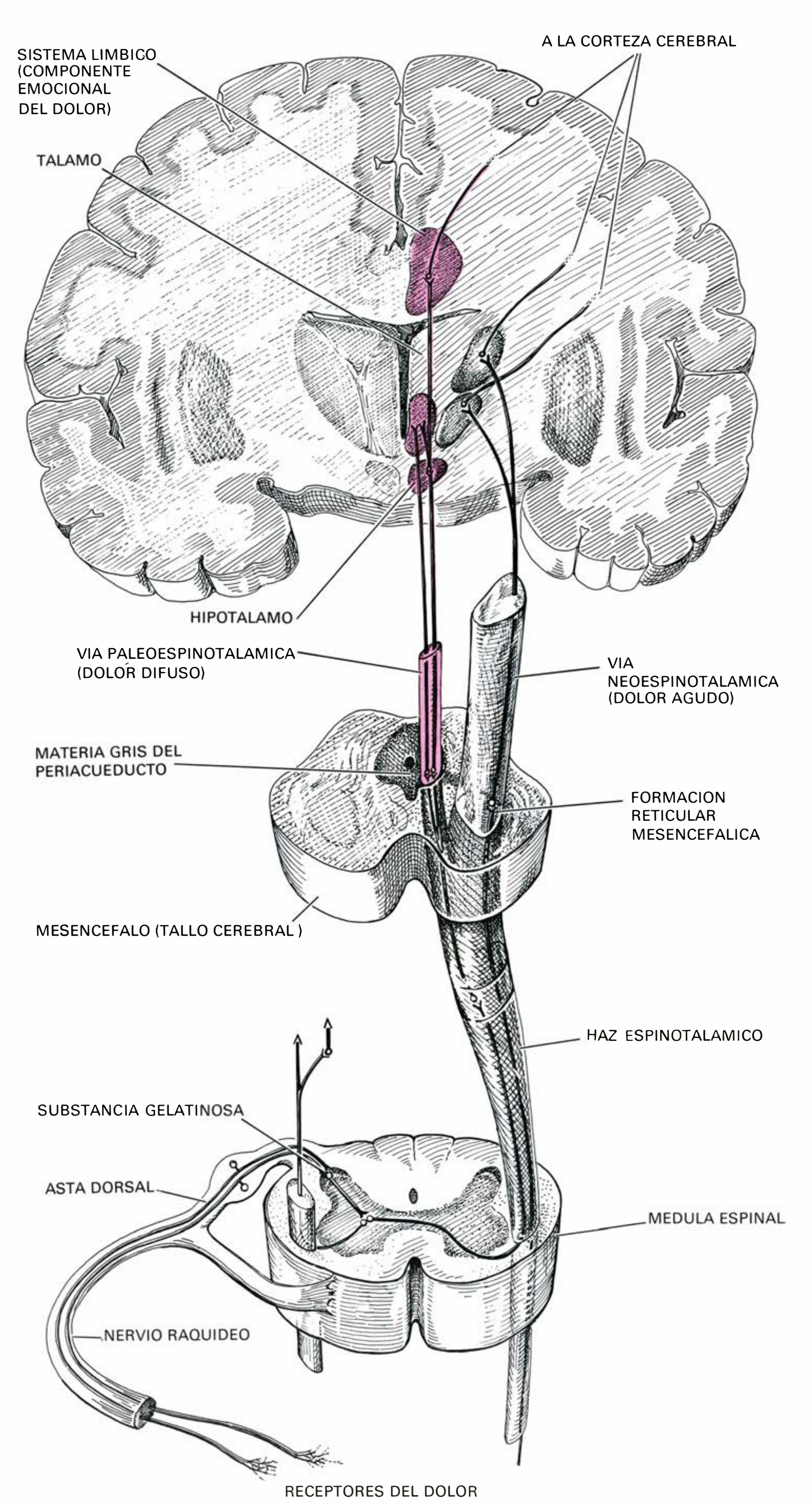
Existen principalmente dos vías cerebrales implicadas en la percepción del dolor. Los compuestos opiáceos apenas alivian el dolor agudo y localizado; parece que éste se transmite por una vía de evolución tardía que consiste en una serie de grupos de células a cada lado del tálamo, que es un importante centro de integración de la información sensorial. En cambio, los compuestos opiáceos alivian con relativa eficacia el dolor difuso, más crónico y menos localizado; parece que éste se transmite por una vía de evolución más temprana que consiste en muchas neuronas interconexas, la mayoría de las cuales carecen del aislamiento de la vaina grasa de mielina y, por tanto, conducen los impulsos con lentitud. Esta vía, que se llama sistema paleoespinotalámico, asciende por la línea media del cerebro; sus estaciones de relevo comprenden la materia gris central del tallo cerebral y la parte central del tálamo.

Pert, Michael J. Kuhar y el autor midieron la distribución del receptor opiá-

ceo en muchas regiones del cerebro, en monos y en el hombre, utilizando las técnicas directas de unión con el receptor y la autorradiografía de secciones del cerebro a las que se había unido un activador marcado con radiactividad. El mapa de distribución del receptor en el cerebro coincide de forma sorprendente con la vía paleoespinotalámica del dolor. También se encuentra una alta densidad de uniones del receptor con el compuesto opiáceo en la amígdala, en el cuerpo estriado y en el hipotálamo, estructuras pertenecientes al sistema límbico, es decir, a un grupo de regiones del cerebro que, en gran parte, son mediadoras del comportamiento emocional. Aunque tradicionalmente estas regiones no estén asociadas con la percepción del dolor, algunos animales parecen aterrorizados, como si acusaran un dolor, cuando se les estimula eléctricamente algunas partes del sistema límbico. En consecuencia, estas regiones cerebrales parecen estar más relacionadas con el componente emocional del dolor y quizá también más relacionadas con los efectos eufóricos de los compuestos opiáceos que con sus efectos analgésicos.

En el interior de la médula espinal, los receptores opiáceos se localizan en una franja densa que corresponde a la *substantia gelatinosa,* que es una importante estación de relevo para la conducción ascendente de la información sensorial relacionada con el dolor. Esta última observación nos remite a una larga controversia sobre las zonas que participan en la producción de la analgesia opiácea: ¿Es sólo el cerebro o también la médula espinal? Hoy se toma como probable que ambos participan. También hay receptores localizados en la *substantia gelatinosa* del núcleo trigémino caudal de la médula espinal. Esta región recibe fibras amielínicas que transmiten estímulos dolorosos procedentes de la cara y las manos, proporcionando así una vía de regulación de las sensaciones dolorosas cuyo origen está en dichas zonas del cuerpo. En el tallo cerebral, los receptores opiáceos se encuentran densamente agrupados en lo que se denomina los núcleos solitarios, lo cual explicaría la forma en que los compuestos opiáceos deprimen el reflejo de la tos y reducen la secreción gástrica, y también en el área postrema, que contiene los lugares en que, según parece, los opiáceos inducen el vómito y la náusea.

Para profundizar en la investigación del significado biológico general del receptor opiáceo, hicimos mediciones de uniones con el receptor en una amplia gama de especies animales. Estas unio-

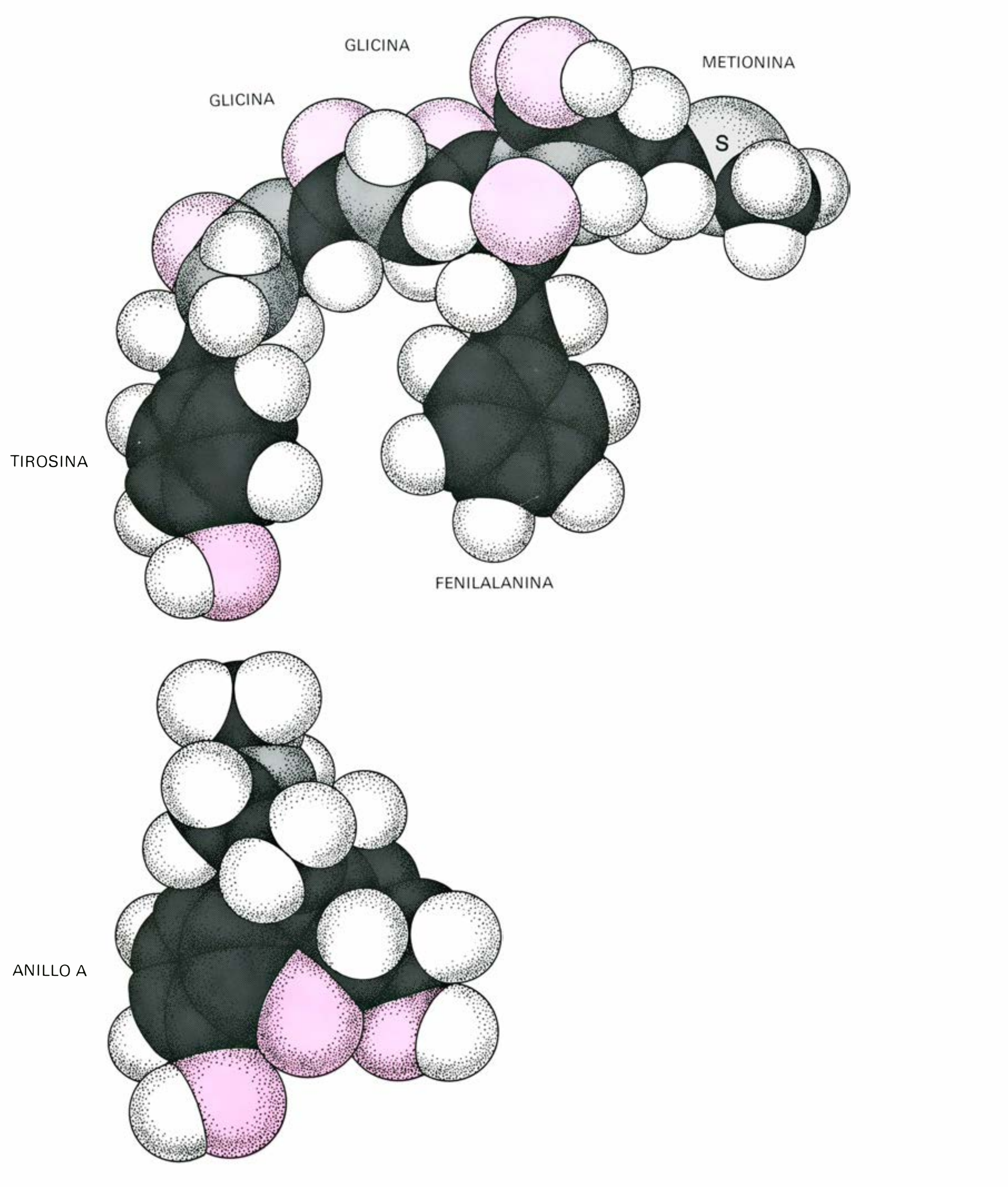


LAS VIAS DEL DOLOR, que conducen la información desde la periferia del sistema nervioso hasta el cerebro, están separadas en dos tipos: la vía neoespinotalámica de localización lateral, que transmite el dolor agudo y localizado, y la vía paleoespinotalámica *(en color)*, de localización media, que transmite el dolor ardiente y menos localizado. Los opiáceos son los que mejor alivian el dolor ardiente; los receptores opiáceos se concentran en la *substantia gelatinosa* y en el tálamo central.

nes se detectaron en el cerebro de todos los vertebrados que examinamos; en cambio, su ausencia fue sorprendente en los invertebrados. Al contrario de lo que se esperaba, no existía ninguna tendencia evolutiva en este sentido. La unión receptor-opiáceo era cuantitativamente igual tanto en monos y en humanos como en los vertebrados más primitivos que estudiamos, por ejemplo, la lamprea y el tiburón. Además, el receptor opiáceo de estos peces primitivos presentaba casi la misma especificidad para con la droga que el receptor opiáceo de los mamíferos, lo cual significaba que, durante el curso de la evolución de los vertebrados, habían ocurrido pocos cambios, si es que hubo alguno, en la estructura química del receptor. Todo lo cual nos sugirió que la función normal del receptor opiáceo era recibir alguna molécula que se ha mantenido inalterada a lo largo de la evolución.

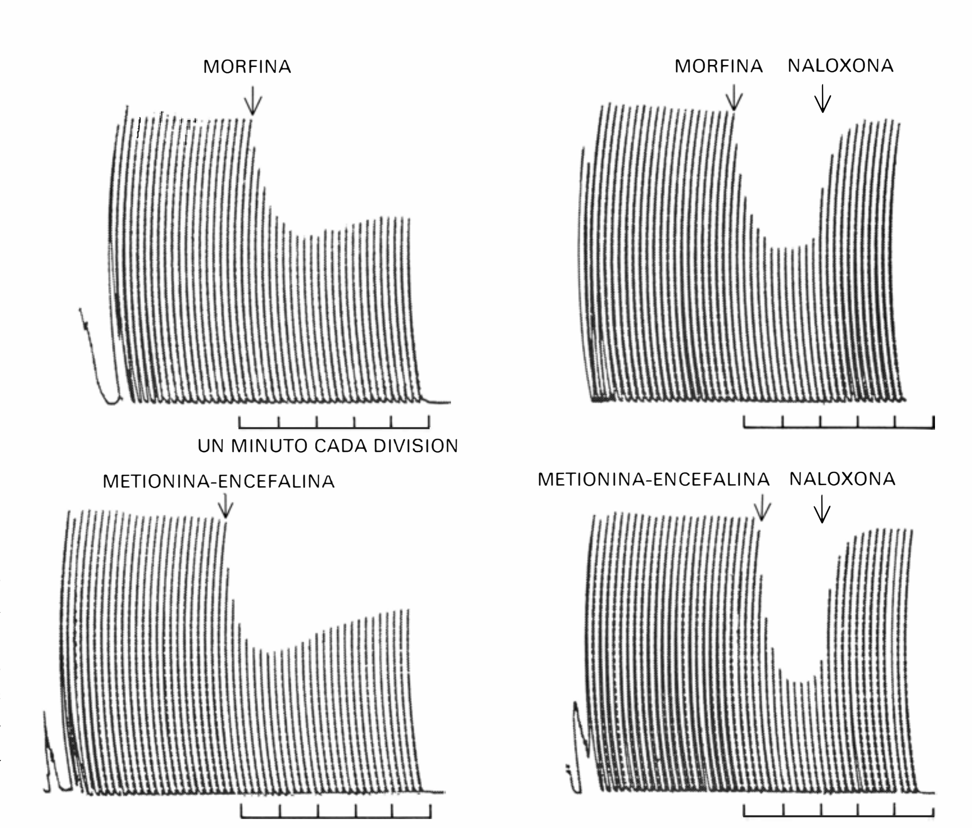
Lo que es seguro es que el hombre no fue hecho con morfina en su interior. La existencia de lugares receptores opiáceos específicos en todos los vertebrados manifestaba obviamente la presencia en el cerebro de una sustancia natural similar a la morfina, quizás un neurotransmisor, que actuara en esos lugares. Esta deducción se basaba en los experimentos que averiguaban la localización de los receptores opiáceos en el tejido nervioso.

Se cree que los opiáceos, como la mayoría de las drogas que afectan a la mente, actúan en primer lugar en las sinapsis del cerebro; la sinapsis es una



MODELOS MOLECULARES ESPACIALES de la morfina *(abajo)* y de la metionina-encefalina *(arriba)*, que es una substancia similar a la morfina localizada en el cerebro. Tienen algunas características estructurales comunes. El anillo bencénico *A* de la morfina, que lleva un grupo hidroxilo, está orientado exactamente de la misma manera que el anillo bencénico del aminoácido tirosina que se halla en una extremidad de la cadena peptídica de la encefalina, lo que sugiere que este grupo se une al receptor opiáceo en ambos casos. El segundo anillo de la molécula de encefalina es el del aminoácido fenilalanina, y parece presentar interacción con la conformación activadora del receptor opiáceo.

región especializada en la que el terminal de una fibra nerviosa se une a la membrana externa de otra célula nerviosa cuya actividad está químicamente modulada por la primera célula. Es posible fraccionar el tejido cerebral en diferentes componentes subcelulares, a fin de localizar los receptores a nivel submicroscópico. Cuando se homogeneiza cerebro en una solución de sacarosa a determinadas concentraciones, las terminaciones nerviosas se desgarran y se vuelven a soldar formando sáculos intactos denominados sinaptosomas. En el interior de los sinaptosomas se encuentran las vesículas sinápticas, que almacenan el contenido de neurotransmisor de la terminación nerviosa, y algunas mitocondrias, que suministran energía para su actividad. Cuando se preparan los sinaptosomas por los procedimientos clásicos, a muchos de ellos se les adhiere la membrana de la otra célula que participa en la sinapsis. Un solo sinaptosoma puede constituir una sinapsis completa.



LA ENCEFALINA IMITA A LA MORFINA, en lo que respecta a la inhibición de las contracciones del intestino de cobaya, inducidas por estimulación eléctrica. Ello se desprende de la lectura de estos registros de polígrafo obtenidos mediante el aparato mostrado anteriormente. La inhibición que ejerce la encefalina, como la que ejerce la morfina, queda bloqueada por el inhibidor naloxona. La semejanza de los efectos de ambos compuestos sugiere que actúan en el mismo receptor.

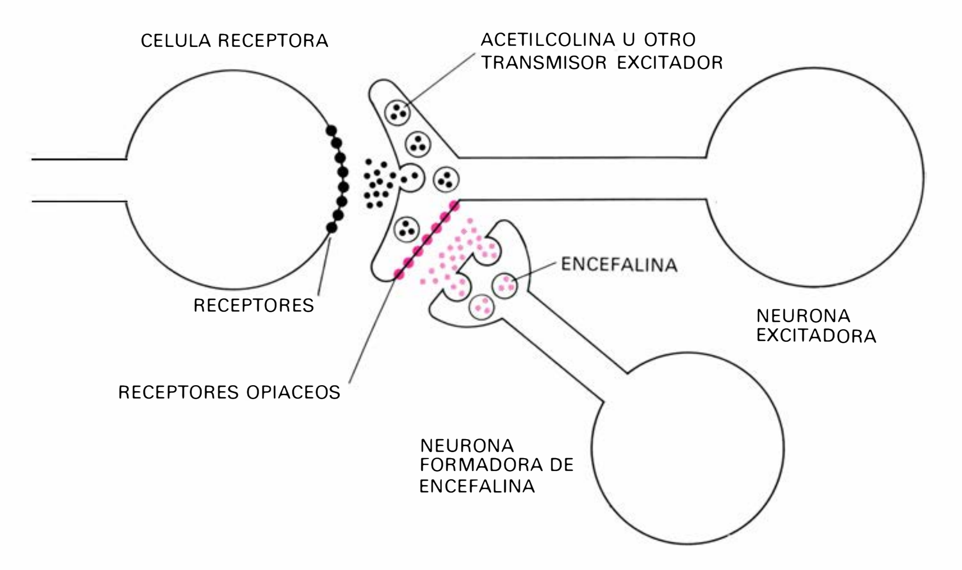
Los sinaptosomas se pueden romper por choque osmótico, al colocarlos en agua. Se liberan entonces las vesículas sinápticas y las mitocondrias que estaban en el terminal; y las membranas que estaban unidas por la sinapsis se separan. Si se introducen estos fragmentos en una centrífuga, se pueden separar las vesículas sinápticas, las mitocondrias y las membranas sinápticas. Cuando aplicamos todos estos procedimientos de fraccionamiento subcelular al tejido cerebral, y medimos la unión receptor-opiáceo en las distintas fracciones, nos encontramos con que las uniones al receptor estaban restringidas en gran parte a las fracciones de sinaptosoma. Al romper los sinaptosomas, recogimos al receptor principalmente en las membranas sinápticas; había poca cantidad de receptor asociada a las vesículas sinápticas, cuando no faltaba totalmente. Por tanto, parece ser que el receptor opiáceo está asociado a regiones sinápticas del cerebro.

Puesto que los neurotransmisores actuaban a nivel de la sinapsis, parecía que el receptor opiáceo funcionaba más o menos como el lugar receptor de una sustancia neurotransmisora natural del cerebro. En ciertos experimentos llevados a cabo por John Hughes y Hans W. Kosterlitz, de la Universidad de Aberdeen, se obtuvieron pruebas directas de la existencia de un transmisor parecido a la morfina, del tipo hipotético descrito. Hacía años que Hughes y Kosterlitz habían estado estudiando los efectos de la morfina sobre los músculos involuntarios del intestino de cobaya y el *vas deferens* de ratón, que consiste en un tubo contráctil que conduce el esperma desde los testículos hasta la uretra. Al igual que ocurre en el intestino de cobaya, las contracciones inducidas por estímulos eléctricos en el *vas deferens* de ratón desaparecen con los opiáceos. Hughes y Kosterlitz descubrieron que unos extractos de tejido cerebral tenían un efecto similar. El efecto era estereoespecífico, pero también quedaba inhibido ante bajas concentraciones del inhibidor naloxona; resultaba evidente, pues, que el factor cerebral parecido a la morfina se unía a los receptores opiáceos. Lars Terenius, de la Universidad de Uppsala, por una parte, y Pasternak y yo, por otra, logramos independientemente la identificación de una misma sustancia procedente de extractos de cerebro, siguiendo un procedimiento en que se controlaba la capacidad de esta sustancia para competir con opiáceos radiactivos por el lugar de unión del receptor opiáceo.

Posteriormente, Hughes y Kosterlitz lograron la extracción del factor similar a la morfina que se encontraba en el cerebro de los cerdos. Comprobaron que dicho factor estaba constituido por dos péptidos cortos e íntimamente relacionados, compuestos ambos por unidades de cinco aminoácidos.

Dieron el nombre de encefalina a tales péptidos, denominación derivada del significado de la expresión griega "en la cabeza". Uno de los péptidos, la metionina-encefalina, tiene la secuencia NH_2-tirosina-glicina-glicina-fenilalanina-metionina-COOH. El otro, la leucina-encefalina, tiene iguales los cuatro primeros aminoácidos y el quinto es leucina en lugar de metionina. Hughes y Kosterlitz hallaron que el cerebro de cerdo contenía aproximadamente cuatro veces más metionina-encefalina que leucina-encefalina. En cambio, Rabi Simantov y el autor purificaron en el laboratorio de este último las dos encefalinas del cerebro de vacunos, y vieron que la relación entre ambos péptidos era inversa a la hallada por ellos. Dado que el código genético para la leucina y para la metionina difiere tan sólo en uno de los tres nucleótidos, quizás esta discrepancia entre las especies se deba sencillamente al resultado de una deriva genética debida al azar. Por otra parte, se ha demostrado que la relación entre las dos encefalinas varía de unas regiones a otras en el cerebro, lo que sugiere que la ligera diferencia estructural que existe entre ambos péptidos podría desempeñar alguna función reguladora.

Ahora ya tenemos bastantes pruebas indicadoras de que las encefalinas son



EL MECANISMO DE INHIBICION de la encefalina podría ser indirecto. En vez de actuar inmediatamente sobre la neurona receptora, la sustancia podría bloquear la liberación de neurotransmisores excitadores, como la acetilcolina y el glutamato, disminuyendo así la fuerza excitadora que llega a la célula receptora. Según el modelo del autor, la encefalina liberada de una neurona se une a los receptores opiáceos situados sobre el terminal de una neurona excitadora, despolarizando parcialmente la membrana del terminal y disminuyendo la despolarización neta producida por la llegada de un impulso nervioso. La cantidad de neurotransmisor liberada por el terminal es proporcional a la despolarización neta, por lo que se libera menos neurotransmisor excitador. En consecuencia, la célula receptora también está expuesta a una estimulación excitadora menor y reduce su frecuencia de producción de impulsos. Un sistema inhibidor de este tipo para la encefalina podría modular la actividad de las vías ascendentes que conducen los estímulos dolorosos de la médula espinal y del cerebro. Las drogas opiáceas actuarían uniéndose a los receptores de la encefalina desocupados, reforzando así los efectos del sistema.

neurotransmisores de sistemas neuronales específicos localizados en el cerebro, que participan en la integración de la información sensorial relacionada con el dolor y el comportamiento emocional, y que también desempeñan otras funciones desconocidas. Las variaciones de los niveles de encefalina según las regiones tienden a ser paralelas a la distribución de los receptores opiáceos. Lo que es más: parece que las encefalinas están localizadas en los terminales nerviosos. En mi laboratorio, Simantov purificó ambas encefalinas procedentes de cerebro de vacuno; obtuvo los correspondientes anticuerpos inyectándolas en cobayas. Kuhar y él, como también Tomas Hökfelt, del Real Instituto Carolino de Estocolmo, lograron entonces localizar las encefalinas en el tejido nervioso, mediante la fijación de un colorante fluorescente en las moléculas de anticuerpo para que los complejos anticuerpo-encefalina brillaran al ser irradiados con luz ultravioleta. En estos experimentos, Simantov y Kuhar observaron que la fluorescencia estaba restringida a los terminales de las neuronas cerebrales, lo que concordaba con la hipótesis de que la encefalina era un neurotransmisor. La distribución de los terminales relacionados con la encefalina, determinada por la técnica del anticuerpo fluorescente, presentaba una estrecha semejanza con la de los receptores opiáceos, resultante del método de elaboración de un mapa autorradiográfico: los terminales se encontraban en la *substantia gelatinosa* de la médula espinal, en la amígdala del sistema límbico y en la parte central del tálamo.

En cuanto a otras regiones distintas del cerebro, se ha detectado encefalina en todo el tracto gastrointestinal de muchas especies, pero no se ha demostrado su presencia en ningún otro tejido, por lo menos en cantidades significativas. Su estricta localización en los intestinos y en el cerebro recuerda a la distribución de otros péptidos que parecen desempeñar papeles hormonales en los intestinos y actuar como neurotransmisores en el cerebro: tal es el caso de la somatostatina y de la sustancia *P*.

¿Cómo podría actuar la encefalina sobre las células del cerebro? Si se aplican opiáceos a neuronas que poseen receptores opiáceos específicos, suele inhibirse la frecuencia de producción de impulsos nerviosos en estas células. Dicha inhibición puede deberse a cualquiera de toda una serie de mecanismos. En principio, se supone que los neurotransmisores se unen a los receptores localizados en la membrana de la neurona receptora, desencadenando así alguna alteración de las propiedades de la membrana, como puede ser un cambio de su permeabilidad a los iones. En su estado de reposo, la membrana está polarizada: su cara externa tiene carga positiva con respecto a su interior. La mayoría de los transmisores excitadores conocidos, como la acetilcolina y el glutamato, facilitan la emisión de impulsos en la neurona receptora porque producen un flujo de iones sodio con carga positiva a través de la membrana celular, quedando ésta despolarizada. Los transmisores inhibidores que se han identificado claramente, como la glicina y el GABA, aumentan la resistencia de la membrana a las despolarizaciones que ocasionan los transmisores activadores. Este efecto lo consiguen incrementando la permeabilidad de la membrana a los iones cloro con carga negativa, y, por tanto, hiperpolarizándola.

Resulta sorprendente, pero la acción inhibidora de la encefalina difiere bastante de la acción de la glicina o de la del GABA. Walter Zieglgansberger y Albert Herz, del Instituto Max Planck de Psiquiatría de Munich, han demostrado, tras inserción de unos electrodos en la neurona receptora, que ésta no sufre hiperpolarización en presencia de encefalina ni de compuestos opiáceos; en cambio, la inhibición se provoca por una disminución del caudal de sodio que despolariza a la membrana. Zieglgansberger y Herz concluyeron que los opiáceos y la encefalina inhiben la actividad neuronal en algunos sistemas, al bloquear la entrada de sodio que provocan los neurotransmisores excitadores, según parece, por una acción directa sobre los poros de la membrana de la célula receptora, a través de los cuales fluye el sodio.

Pruebas recientes sugieren que la encefalina podría tener otro mecanismo de inhibición. Hace poco, un experimento llevado a cabo por Carol C. LaMotte, Pert y el autor demostró que los receptores opiáceos no se hallan estrictamente localizados en las células receptoras. Seccionamos la raíz dorsal de la médula espinal del mono para que degeneraran los nervios sensitivos aferentes. Sin embargo, sus células destinatarias, situadas en la *substantia gelatinosa* de la médula espinal, permanecieron inalteradas. Se observó luego una disminución significativa del número de receptores opiáceos medibles, indicando, por tanto, que los receptores debían encontrarse tanto en los terminales como en las células receptoras. El descubrimiento de dichos receptores hizo surgir un nuevo modelo de la inhibición ocasionada por la encefalina.

Se sabe que la liberación del neurotransmisor de un terminal nervioso viene desencadenada por la despolari-

zación de la membrana del terminal, fenómeno que se produce cuando el impulso nervioso se propaga hasta alcanzar la extremidad de la fibra nerviosa. La cantidad de transmisor liberada parecer ser proporcional al grado de despolarización: cuanto más despolarizada está la membrana, tanto más transmisor se secreta. Pudiera ser que las neuronas liberadoras de encefalina formasen sinapsis con los terminales de neuronas excitadoras. La encefalina que se liberara en estas sinapsis se uniría a los receptores opiáceos del terminal excitador, aumentando la conductancia del sodio a través de la membrana de dicho terminal y despolarizándola parcialmente. Si un impulso nervioso alcanzara posteriormente al terminal, disminuiría la despolarización neta producida por el impulso y la cantidad de transmisor excitador liberado sufriría el descenso correspondiente. Aunque, en este caso, la acción propia de la encefalina sería excitadora, consistente en aumentar el paso de sodio a través de la membrana del terminal, el efecto final sobre la célula que reciba los terminales excitadores sería de tipo inhibidor, ya que quedaría disminuida la cantidad de transmisor excitador que module su actividad.

Este último modelo concuerda bastante con los conocimientos que tenemos sobre la función del receptor opiáceo, a partir de ciertos experimentos realizados *in vitro*. Como quedó dicho, el sodio efectúa cambios importantes en la unión de los opiáceos: aumenta la afinidad del receptor opiáceo por los inhibidores y disminuye su afinidad por los activadores. En los seres vivos, se supone que el sistema actúa al revés, siendo la unión del opiáceo o de la encefalina con el receptor lo que hace variar su afinidad por el sodio, alterando por tanto la permeabilidad de la membrana a este ion. En el modelo de la inhibición a nivel del terminal nervioso, el incremento de la conductancia del sodio despolarizaría al terminal de una neurona excitadora, disminuyendo la secreción del neurotransmisor excitador. En los sistemas estudiados por Zieglgansberger y Herz, quedaría disminuida la conductancia del sodio. Ambos efectos hipotéticos sobre la conductancia del sodio concuerdan con las pruebas bioquímicas que relacionan al sodio con el receptor opiáceo.

Constituye un hecho significativo el que, cuando se da morfina a ratas enviciadas con esta droga, no se inhibe la actividad de sus células cerebrales, sino que, incluso, puede ser excitada. Dado que todos estos fenómenos se producen a nivel de la membrana celular que contiene al receptor opiáceo, es, al parecer, a ese nivel en donde se ha de buscar el mecanismo de la toxicomanía por opiáceos y sustancias afines.

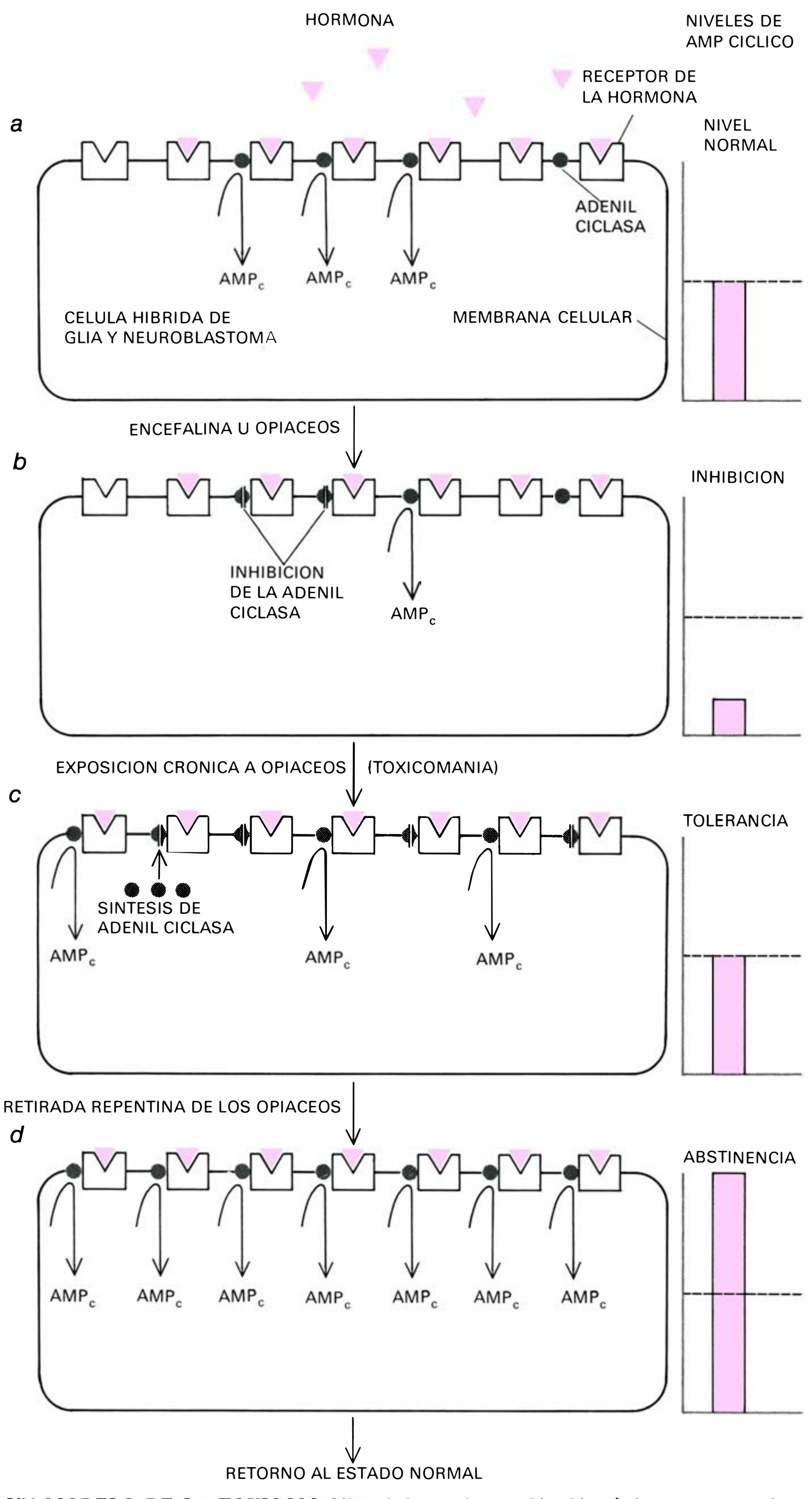
Aunque el término toxicomanía no es fácil de definir, ésta se manifiesta en todos los casos a través de fenómenos de tolerancia y dependencia física. La tolerancia se refiere a la situación en la que, tras la administración repetida de una droga, son necesarias dosis elevadas para que se den los efectos que, anteriormente, se producían con dosis mucho menores. La tolerancia se produce con múltiples tipos de drogas, tanto si éstas son enviciantes como si no lo son. Uno de los mecanismos de la tolerancia es metabólico: la droga estimula la síntesis hepática de enzimas que la destruyen. Por ello, se necesitan dosis superiores para alcanzar, en la sangre y en los tejidos, los mismos niveles que anteriormente se alcanzaban con dosis menores. Hay una forma de tolerancia más importante, sobre todo en el caso de las drogas que producen toxicomanía, que se llama tolerancia celular. Tras la exposición prolongada a drogas tales como el alcohol, los barbitúricos y los opiáceos, ni siquiera llegan a ser eficaces los niveles elevados de la droga en el cerebro, por lo que también se necesitan dosis progresivamente mayores. Aunque la tolerancia celular no implica necesariamente la existencia de toxicomanía, todas las drogas enviciantes conocidas producen tolerancia celular.

Por su parte, la dependencia física se halla todavía más íntimamente ligada a la toxicomanía. Se dice que se da dependencia física cuando el que toma la droga desarrolla unos graves síntomas de abstinencia, al suspenderse la administración de la droga. En los alcohólicos agudos, los síntomas que se manifiestan son: temblores, convulsiones y alucinaciones visuales del *delirium tremens*; en los toxicómanos de compuestos opiáceos: fuertes dolores de estómago, diarrea, insomnio y excitación nerviosa con dilatación de las pupilas y carne de gallina (de aquí la expresión "pavo frío").

Existe también un fenómeno de tolerancia cruzada entre distintas drogas de un tipo determinado. Los toxicómanos que son tolerantes a un opiáceo también lo serán a otro, lo que permite a los médicos tratar a los enfermos a los que se les ha quitado la heroína, con otros opiáceos como la metadona. Los mecanismos cerebrales de la tolerancia y la dependencia parecen ser comunes al alcohol, a los barbitúricos y a las drogas ansiolíticas, como el clorodiacepóxido (Librium) o el diacepam (Valium). Por tanto, se puede aliviar el *delirium tremens* de la abstinencia alcohólica no sólo con alcohol sino también con barbitúricos y drogas ansiolíticas. En cambio, no existe tolerancia cruzada entre la clase de los opiáceos y la clase del alcohol, los barbitúricos y las drogas ansiolíticas. No obstante, en un sentido formal, los procesos de tolerancia y de dependencia física son iguales para la mayoría de los distintos tipos de drogas. Por ello, si se pudiera entender los mecanismos bioquímicos responsables en un tipo de ellas, como, por ejemplo, en las drogas opiáceas, también se sabría algo más de lo que ocurre en otros tipos de drogas.

El descubrimiento de la encefalina ha sugerido qué tipo de papel podrían desempeñar las neuronas liberadoras de encefalina en la toxicomanía opiácea. Un modelo sencillo puede explicar cómo unos cambios en la frecuencia de producción de impulsos de las neuronas de encefalina podría ser la causa de las manifestaciones externas de la toxicomanía en el comportamiento, es decir, de la tolerancia y de la dependencia física. En condiciones de reposo, los receptores opiáceos están sometidos a un determinado nivel basal de encefalina. La morfina administrada suele unirse a los receptores desocupados, reforzando así los efectos analgésicos del sistema de la encefalina. Si el tratamiento con morfina es prolongado, las células que poseen receptores opiáceos se encuentran con una sobrecarga de material opiáceo y, por algún bucle hipotético de realimentación neuronal, envían un mensaje a las células de encefalina para detener su producción de impulsos y su liberación de encefalina. Cuando esto ocurre, las células receptoras están sometidas tan sólo a la morfina, de modo que la toleran en cantidades superiores a fin de sustituir a la encefalina que ya no reciben. Cuando cesa la administración de morfina, los receptores opiáceos se encuentran con que no tienen ni morfina ni encefalina, y esta carencia inicia una secuencia de sucesos que dan lugar a los síntomas de abstinencia.

Hay experimentos recientes que apoyan el modelo anterior. En otros sistemas neurotransmisores del cerebro, la detención de la producción de impulsos nerviosos está asociada a una acumulación del neurotransmisor contenido en el cerebro, que se debe sencillamente a que se sigue sintetizando el transmisor aunque no se siga liberando. Si lo mismo ocurre en los sistemas de encefalina, es de esperar que los niveles de ésta se



UN MODELO DE LA TOXICOMANIA, dado por los cambios bioquímicos que acompañan a la administración de morfina a células de un cultivo de neuronas cancerosas. Al ser estimulado por ciertas hormonas, el enzima adenil ciclasa, que está encajado en la membrana, sintetiza la molécula de adenosínmonofosfato cíclico (AMP cíclico, o AMPc), que actúa como mensajero intracelular y es mediador de los efectos fisiológicos de la hormona *(a)*. La administración de opiáceos inhibe a la adenil ciclasa, disminuyendo los niveles de AMP cíclico *(b)*. Tras una exposición prolongada a los compuestos opiáceos, la célula se adapta y sintetiza un mayor número de moléculas del enzima, para que haya una cantidad normal de AMP cíclico presente *(c)*. La célula se ha vuelto "tolerante" a la dosis original del opiáceo. Cuando cesa la administración de la droga, todas las moléculas del enzima están activas y sintetizan AMP cíclico en exceso *(d)*. Este exceso podría ser el factor desencadenante de una secuencia de hechos que abocan en los síntomas de abstinencia.

eleven durante el desarrollo gradual de la tolerancia y de la dependencia física. Una vez se haya quitado la morfina a los animales y se hayan calmado las manifestaciones de abstinencia en la conducta, los niveles de encefalina deberían volver a valores normales. Estas suposiciones fueron confirmadas por otros experimentos realizados por Simantov y el autor. En ratas a las que se administró morfina de forma regular, los niveles de encefalina se duplicaron durante el proceso de toxicomanía. Cuando se precipitaba la abstinencia mediante un tratamiento con naloxona, los animales mostraron una serie de síntomas de abstinencia que desaparecieron al cabo de una hora aproximadamente, volviendo a su valor normal los niveles de encefalina.

Pero, ¿cómo se puede transmitir en el interior de una neurona la información referente a la presencia o ausencia de opiáceos o de encefalina en los receptores opiáceos? Una parte del mecanismo podría ser el cambio en la conductancia del sodio. También podrían desempeñar alguna función las sustancias conocidas como nucleótidos cíclicos, que intervienen en el mecanismo de otros neurotransmisores y hormonas, y son los responsables intermedios de los efectos intracelulares de estos compuestos, tras su unión a los receptores situados en la superficie externa de la célula. Los nucleótidos cíclicos adenosínmonofosfato cíclico (AMP cíclico) y guanosínmonofosfato cíclico (GMP cíclico) son sintetizados por la acción de los enzimas adenil ciclasa y guanil ciclasa, respectivamente. Se cree que ambos enzimas flotan libremente en la doble capa de moléculas lipídicas que constituye la membrana celular. Cuando tropiezan con un receptor proteico al que está unida una molécula del neurotransmisor adecuado, se activan y empiezan a sintetizar AMP cíclico o GMP cíclico. A menudo parece que ambos nucleótidos cíclicos son antagónicos uno del otro, en el sentido de que son intermediarios que provocan los efectos intracelulares de hormonas que tienen efectos opuestos sobre el mismo sistema. Por ejemplo, la acetilcolina, que provoca la contracción del músculo involuntario, produce en sus células destinatarias un aumento del nivel de GMP cíclico y una disminución del nivel de AMP cíclico. Por otra parte, la epinefrina, que provoca la relajación del músculo involuntario, produce, en las mismas células, un aumento de AMP cíclico y una disminución de GMP cíclico. Se supone que ambos transmisores actúan modificando las ac-

tividades relativas de la adenil ciclasa y de la guanil ciclasa.

Varias de las drogas que alteran los niveles intracelulares de los nucleótidos cíclicos afectan a las acciones de los opiáceos e incluso pueden simular unos efectos similares a los que se dan en la abstinencia opiácea. Además, los propios opiáceos deprimen el nivel de adenil ciclasa en el cerebro e inhiben la acción estimuladora de ciertas hormonas sobre la síntesis del enzima. Resulta significativo que las relativas potencias de los compuestos opiáceos como inhibidores de la síntesis de la adenil ciclasa sean paralelas al efecto que tienen sobre la unión receptor-compuesto opiáceo en tales células. Estas drogas, asimismo, incrementan simultáneamente el nivel intracelular de GMP cíclico, quizá por una activación selectiva del enzima guanil ciclasa. Por tanto, al igual que ocurre en otros sistemas biológicos, parece que los compuestos opiáceos afectan a los dos nucleótidos cíclicos principales en direcciones opuestas.

Los experimentos de Marshall W. Nirenberg y de Werner A. Klee, realizados en los National Institutes of Health con cultivos de células nerviosas cancerosas, han puesto de manifiesto que los efectos de los opiáceos sobre los niveles de nucleótidos cíclicos podrían explicar algunos aspectos de la toxicomanía. Las células cerebrales no se dividen ni se multiplican, como sucede en la mayoría de los demás tipos de células, por lo que no se pueden obtener cultivos de estas células en su estado normal. En cambio, sí puede cultivarse células nerviosas cancerosas obtenidas del tumor del sistema nervioso llamado neuroblastoma. En sus experimentos, Nirenberg y Klee utilizaron células híbridas creadas por fusión de células de neuroblastoma y células gliales procedentes de otro tipo de tumor cerebral. (Las células de la glía, que representan un 90 por ciento de las células del cerebro, engloban a las neuronas y les suministran nutrientes esenciales.) Nirenberg y Klee observaron los efectos de una exposición crónica a la morfina o la encefalina sobre los niveles intracelulares de nucleótidos cíclicos en las mencionadas células híbridas de glía y neuroblastoma. Comprobaron que la adenil ciclasa es inhibida por los opiáceos; ahora bien cuando el período de exposición es prolongado, las células compensan este efecto sintetizando una mayor cantidad de moléculas del enzima. En consecuencia, para producir descensos de AMP cíclico, se necesitan concentraciones mayores de opiáceos, pues las moléculas adicionales de adenil ciclasa sustituyen a las que han quedado inhibidas por los opiáceos.

Parece, pues, que el sistema se vuelve "tolerante"; tras un tratamiento continuado con morfina o encefalina, las concentraciones que, en un principio, disminuían los niveles de AMP cíclico en las células ya no consiguen producir cambios en éstos. Al retirar la morfina, los niveles de AMP cíclico se elevan de forma notoria, debido a que no están inhibidas las moléculas de adenil ciclasa recién sintetizadas. Esta formación excesiva de AMP cíclico constituye seguramente el proceso correspondiente a los síntomas de abstinencia, pero a nivel bioquímico. Sin embargo, en los mismos cultivos celulares, el tratamiento prolongado con opiáceos no afecta en absoluto al número de receptores ni a la unión receptor-compuesto opiáceo, lo que prueba que, probablemente, no es a nivel del propio receptor donde tiene lugar la modificación bioquímica fundamental causante de la toxicomanía.

Falta por demostrar que los cambios registrados en los nucleótidos cíclicos hipotéticamente responsables de la toxicomanía se producen en el tejido cerebral; *in vitro* se ha visto, sin embargo, que los opiáceos y la encefalina aumentan el GMP cíclico y reducen el AMP cíclico en cortes de tejido cerebral. Por tanto, parece razonable suponer que los efectos crónicos de la toxicomanía podrían ser similares a los observados por Nirenberg y Klee en los cultivos de células nerviosas. Cabe la hipótesis de que los cambios en la distribución de los nucleótidos cíclicos en el interior de las neuronas que poseen receptores opiáceos funcionen como las señales de realimentación que podrían modificar la frecuencia de producción de impulsos en las neuronas de encefalina, iniciando así el desarrollo de la tolerancia y de la dependencia física.

Estos modelos diseñados para explicar la toxicomanía se han complicado un poco en los últimos años, al descubrirse que las encefalinas no son los únicos péptidos naturales de acción opiácea. Antes del descubrimiento de la encefalina, Goldstein informó ya que existía un factor de efectos similares a los opiáceos, localizado en la glándula pituitaria, que está en la base del cerebro y que difiere del sistema nervioso tanto embriológica como estructuralmente. Este hallazgo se hizo especialmente intrigante cuando Hughes y Kosterlitz se dieron cuenta de una coincidencia sorprendente: la secuencia de aminoácidos de la metionina-encefalina era idéntica a un segmento de la hormona pituitaria beta-lipotropina, que es un péptido normalmente relacionado con la estimulación de la degradación de las grasas. Anteriormente, Choh Hao Li, de la University of California School of Medicine, en San Francisco, había extraído de la glándula pituitaria del camello un fragmento de beta-lipotropina, de una longitud de 31 aminoácidos, cuya función resultaba un tanto misteriosa; en efecto, su actividad metabolizadora de grasas era escasa, pero contenía la secuencia metionina-encefalina. Goldstein lo advirtió y consiguió muestras del péptido de Li, comprobando que tenía efectos opiáceos.

Li denominó a su péptido beta-endorfina, por ser como morfina endógena. Su grado de actividad analgésica era considerable; al inyectarse directamente en el cerebro de animales experimentales, su potencia resultaba 48 veces superior a la de la morfina, y, por vía intravenosa, tres veces mayor. Además, la naloxona, que es un inhibidor específico de los opiáceos, podía bloquear su actividad. Roger Guillemin, del Salk Institute, prosiguió el estudio y aisló otros dos péptidos, además de la beta-endorfina, a partir de una mezcla de tejido hipotalámico y pituitario procedente de cerdos. Uno de los péptidos, llamado alfa-endorfina, tenía una secuencia que correspondía a los aminoácidos 61 a 76 de la secuencia de la beta-lipotropina, y poseía efectos analgésicos y tranquilizantes en los animales. El otro, denominado gamma-endorfina, tenía una secuencia que correspondía a los aminoácidos 61 a 77 de la beta-lipotropina. Producía conducta violenta en ratas.

La función biológica de las endorfinas pituitarias es algo misteriosa. No parece probable que pasen de la pituitaria al cerebro, ya que no existe ninguna comunicación directa entre ambos órganos. Cabe la posibilidad de que regulen funciones pituitarias que, según se sabe, quedan alteradas por los opiáceos. Así, la morfina provoca la liberación de hormona antidiurética (ADH) de la pituitaria posterior. El hecho de que la glándula pituitaria posea receptores opiáceos, de propiedades similares a las de los receptores opiáceos cerebrales, sugiere que la influencia de los opiáceos en la función de la pituitaria posterior, como puede ser la liberación de ADH, puede venir determinada por los propios receptores opiáceos de la pituitaria.

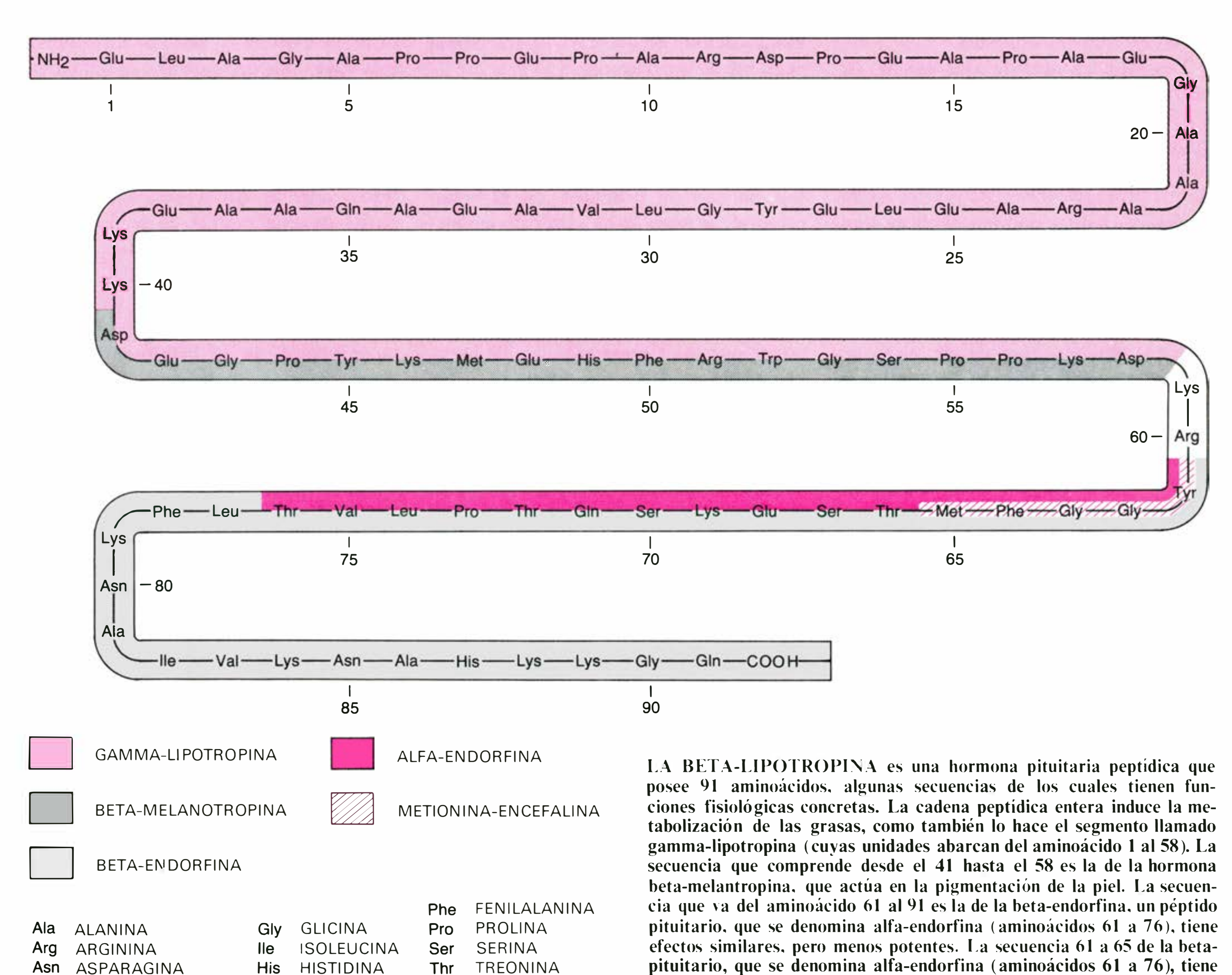
¿Qué relación existe entre la beta-li-

potropina, las endorfinas y la encefalina? Los péptidos biológicamente activos se suelen sintetizar por hidrólisis de péptidos precursores de mayor tamaño.

Se podría pensar que la beta-lipotropina, o una de sus secuencias parciales, actúa como precursor de la encefalina en el cerebro. Pero el hecho es que sólo puede detectarse pequeñas cantidades de beta-endorfina en el tejido cerebral y que nunca se ha denunciado la presencia de la beta-lipotropina en el cerebro. Por tanto, parece probable que los péptidos de mayor tamaño, como la beta-endorfina, desempeñen su papel esencial en la pituitaria, mientras que la encefalina quede limitada al cerebro y a la médula espinal. Puesto que los efectos analgésicos y eufóricos de los opiáceos implican la participación exclusiva del cerebro y de la médula espinal, parece que las acciones analgésicas de las endorfinas son fortuitas y no están relacionadas con su función normal.

La encefalina es rápidamente degradada por unos enzimas proteolíticos; de ahí que resulte difícil evaluar su potencial analgésico cuando se inyecta en un animal por vía intravenosa o incluso directamente en los ventrículos cerebrales. No obstante, utilizando unos compuestos análogos a la encefalina, si bien resistentes a la hidrólisis metabólica, se ha logrado demostrar que las encefalinas tienen una potencia analgésica similar a la de la morfina.

El hecho de que las encefalinas puedan producir analgesia permite pensar que otros compuestos análogos adecuados podrían constituir los analgésicos no enviciantes tan anhelados. Con toda certeza, el hombre no puede desarrollar una toxicomanía respecto de sí mismo. ¿O sí? Cuando se hacen inyecciones repetidas de encefalina o beta-endorfina en los ventrículos cerebrales de ratas, como lo hicieron Eddie T.-F. Wei y Loh, en la University of California School of Medicine, en San Francisco, estos animales desarrollan síntomas de tolerancia y dependencia física. Es difícil decir si las ratas son toxicómanas de la misma forma en que lo pueden ser los seres humanos respecto de la heroína. Dado que, en las ratas, no se pueden obtener respuestas subjetivas, los únicos síntomas de abstinencia que se pueden medir son los temblores y la diarrea. La naturaleza de la dependencia externa provocada por una exposición prolongada a los péptidos opiáceos naturales puede ser cualitativamente diferente de la naturaleza de la que provocan los compuestos opiáceos. Si éste fuera el caso, los activadores-inhibidores combinados, derivados de las encefalinas, tendrían un futuro como analgésicos no enviciantes. De cualquier forma, los esfuerzos tenaces por identificar y conocer al receptor opiáceo y a sus neurotransmisores peptídicos asociados deberían conducirnos a unas mejoras terapéuticas como también a un conocimiento más profundo del funcionamiento cerebral.



LA BETA-LIPOTROPINA es una hormona pituitaria peptídica que posee 91 aminoácidos, algunas secuencias de los cuales tienen funciones fisiológicas concretas. La cadena peptídica entera induce la metabolización de las grasas, como también lo hace el segmento llamado gamma-lipotropina (cuyas unidades abarcan del aminoácido 1 al 58). La secuencia que comprende desde el 41 hasta el 58 es la de la hormona beta-melantropina, que actúa en la pigmentación de la piel. La secuencia que va del aminoácido 61 al 91 es la de la beta-endorfina, un péptido pituitario, que se denomina alfa-endorfina (aminoácidos 61 a 76), tiene efectos similares, pero menos potentes. La secuencia 61 a 65 de la beta-pituitario, que se denomina alfa-endorfina (aminoácidos 61 a 76), tiene efec tos similares, pero menos potentes. La secuencia 61 a 65 de la beta-lipotropina se identifica con la de la metionina-encefalina, péptido similar a la morfina localizado en el cerebro, la médula y los intestinos.

Ciencia y sociedad

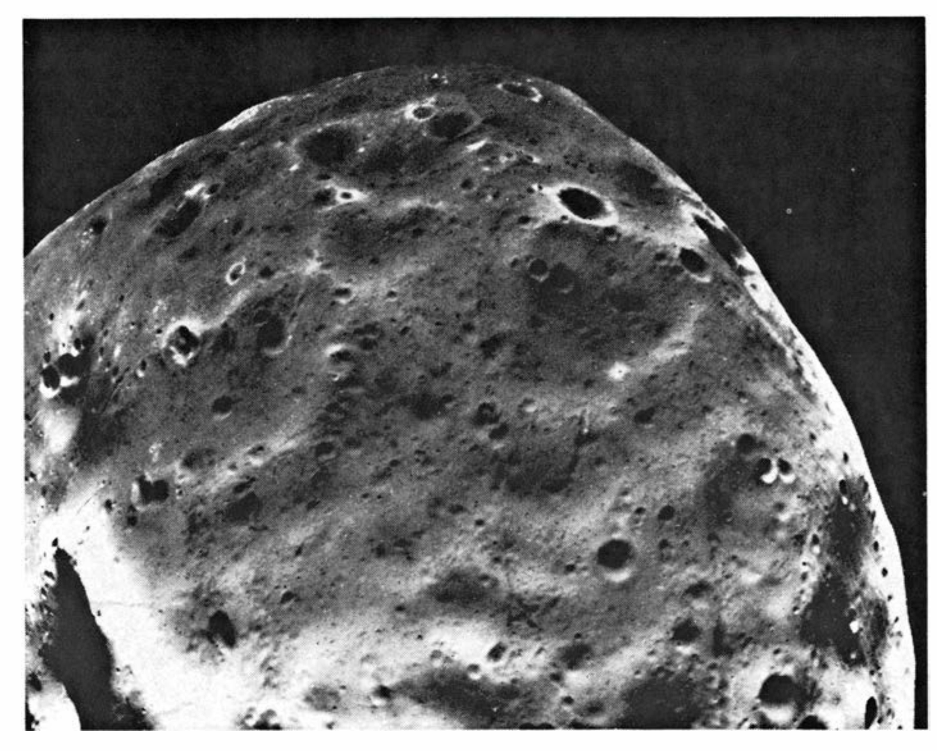
Fobos, de cerca

En su último número, en la revista se publicó un artículo de Joseph Veverka, de la Universidad de Cornell, sobre las dos lunas de Marte. Aportaba fotografías de ambas obtenidas por el *Mariner 9* y el *Viking 2* a lo largo del mes de septiembre del año pasado. El *Viking 1*, posteriormente, con exactitud durante la segunda quincena del mes de febrero, logró fotografiar de nuevo el satélite interior marciano Fobos, revelando la naturaleza del mismo con detalles sin precedentes.

Mientras que las mejores fotografías de las primeras obtenidas se sacaron desde una distancia de 880 kilómetros, aproximadamente, las más recientes han ido acortando distancias, hasta descender a los 100 kilómetros. La resolución eficaz de las mejores imágenes recogidas permite distinguir objetos cuyo diámetro no supera los 10 metros. Además, el *Viking 1* pasó tan cerca de Fobos en su órbita que el campo gravitatorio de éste afectó levemente el recorrido de la nave espacial. Las dimensiones de ese leve trastorno están siendo estudiadas para deducir la masa y la densidad media del satélite, cuyo conocimiento conduce al desciframiento de su composición estructural.

Si bien las primeras fotografías obtenidas de Fobos por parte del *Mariner 9* mostraban una superficie saturada de cráteres primarios que había abierto el impacto de grandes meteoritos, las nuevas imágenes de alta resolución han revelado además que la superficie se halla recubierta de numerosas cadenas de cráteres de formas irregulares, semejantes a las cadenas de cráteres de impacto secundario en la luna. La cadena de cráteres de Fobos se orienta preferentemente en una dirección, a saber, en paralelo al plano de la órbita del satélite en torno a Marte.

Las imágenes de alta resolución han aportado, asimismo, información muy precisa sobre la naturaleza de unos surcos enigmáticos que el *Viking 2* descubrió en la superficie de Fobos. Las fotografías obtenidas mostraron que los surcos parecían hallarse concentrados en las proximidades del polo norte del satélite. Las últimas imágenes han puesto de manifiesto que, en realidad, se trata de cadenas de cráteres paralelas a la dirección en que Fobos se desplaza en su órbita. Los surcos se deberían al posible adelantamiento de Fobos respecto a una nube de desechos llena de objetos de hasta 100 metros de anchura. Si los objetos se hubieran encontrado un tanto al norte del centro de la trayectoria de Fobos, hubieran chocado oblicuamente con el satélite cerca del polo norte, deslizándose o incluso rodando por la superficie de esa luna marciana. Es de esperar que, en los próximos meses, el análisis del centenar de imágenes recogidas por el *Viking 1* revele ampliamente la verdadera naturaleza de Fobos.



Fotografía de Fobos obtenida por el **Viking 1** *a 480 km de distancia*

Incertidumbre inversa

El principio de incertidumbre, introducido por Werner Heisenberg, afirma que el producto de las incertidumbres en los valores de ciertas variables relacionadas entre sí, tales como la posición y el momento de una partícula subatómica, es igual o mayor que la constante de Planck. Con el paso del tiempo, este principio se ha convertido en un tropo para expresar que el observador perturba inevitablemente aquello que está observando. Recientemente, David V. Forrest, James H. Ryan y Phillip Zeidenberg, del New York State Psychiatric Institute, se toparon con un curioso caso del efecto inverso: lo que se estaba observando perturbaba al observador. En un artículo aparecido en *The American Journal of Psychiatry*, describen un estudio clínico de la intoxicación por marihuana, realizado en la Unidad de Investigación de Toxicomanía de dicho Instituto, durante el cual los investigadores se fueron sintiendo cada día más "nerviosos, irritables y mareados".

La causa de sus síntomas quedó patente cuando un análisis de orina de uno de los casos en estudio, al que se suministró cigarrillos sin marihuana (sin advertírselo) para que sirviese como paciente control, reveló la presencia de productos metabólicos de delta-9-tetrahidrocannabinol, que es el ingrediente activo de la

marihuana. Tanto los pacientes control como los investigadores habían sucumbido a una intoxicación pasiva ("un vuelo por contacto") con sólo respirar el aire del cuarto en donde los casos en estudio estaban fumando. Una vez identificada, la interferencia ocasionada por el "efecto Heisenberg inverso" se eliminó, cambiando el dispositivo experimental: los investigadores empezaron a observar a los adictos a la marihuana con cámaras de televisión en circuito cerrado conectadas a una pantalla situada en otra sala.

Refrigerador de partículas

Casi todo lo que se conoce sobre la estructura de la materia se ha aprendido a través de la observación de las colisiones violentas entre las partículas que constituyen los átomos. Los choques más violentos –y por eso quizá los más reveladores– son los que ocurren cuando unas partículas de igual energía colisionan de frente. Por ejemplo, en los anillos de almacenamiento de electrones y positrones, los electrones y sus antipartículas circulan en direcciones opuestas dentro de una sola cámara toroidal. Cuando un electrón y un positrón chocan, se aniquilan entre sí y su energía se convierte en otras formas de materia. La máquina es particularmente sencilla porque, para acelerar y dirigir los haces de materia y de antimateria, pueden usarse los mismos impulsos.

Una ampliación obvia de esta idea sería una máquina parecida en que los protones y sus antipartículas, los antiprotones, describieran órbitas en direcciones opuestas. No se ha construido ningún dispositivo de este tipo, principalmente porque ha parecido demasiado difícil generar un haz de antiprotones bastante intenso, y, además, que pudiese confinarse un tiempo lo bastante largo como para dar por resultado una tasa de choques que valiese la pena. Se dispone ya de dos hipótesis de trabajo según los cuales podría crearse y estabilizarse un haz de tal especie, y se han examinado ciertos planes para convertir a los grandes aceleradores de protones en anillos de almacenamiento de protones y antiprotones. Si se adoptaran estos planes, los aceleradores modificados podrían producir energías de choque 40 veces mayores que las disponibles hoy en día.

El mejor modo de entender en qué reside la dificultad de estabilizar un haz de partículas consiste en examinar las partículas en su propio marco de referencia, como si se estuviesen viajando con el haz, casi a la velocidad de la luz. Se observa entonces que las partículas no se mueven al unísono: unas viajan un poco más rápida o más lentamente que el resto, y todas siguen complicados movimientos transversales a la dirección del haz. El conjunto entero de partículas puede considerarse como un gas, y los movimientos aleatorios indican la temperatura de ese gas. Si esa temperatura es demasiado alta, las partículas golpean las paredes del acelerador y el haz se disipa.

Los electrones (y los positrones) tienen un sistema de enfriamiento natural: cada vez que un electrón es acelerado emite una energía radiante, que se conoce por radiación de sincrotrón. Así se irradia y disipa la energía térmica disruptiva del haz. Pero los protones y antiprotones emiten una radiación sincrotrónica mucho más débil y no pueden amortiguar con rapidez sus movimientos térmicos por sí solos. Por eso se ha propuesto refrigerarlos.

Simon Van der Meer, de la Comisión Europea para la Investigación Nuclear (CERN), diseñó un método que reduce las fluctuaciones aleatorias. Se mide la sección transversal del haz, como la impronta de una perdigonada, en un tramo del anillo, y se establece cuál es "el centro de masa" de dicha impronta. Se calculan luego, rápidamente, las correcciones de la trayectoria y se las aplica mediante campos eléctricos situados más adelante en el anillo. Las señales de corrección pueden alcanzar a tiempo otro tramo del anillo, situado en el extremo opuesto, porque son enviadas a través de una cuerda del anillo mientras que las partículas siguen la circunferencia. A dicha técnica se le dio el nombre de enfriamiento estocástico, puesto que los haces circulantes venían impulsados por un proceso estadístico hacia la órbita pretendida. Se probó en el mismo centro del CERN en 1975.

La segunda técnica, denominada enfriamiento de electrones, la apuntó hace una década Gersh Budker, del Instituto de Física Nuclear de Novosibirsk, Unión Soviética. La idea se ensayó por primera vez allí (en Novosibirsk) el año pasado. Precisa que haya un tramo recto en el anillo de almacenamiento de partículas que lleva protones o antiprotones. Se hacen pasar electrones a través del tramo recto en la misma dirección y a la misma velocidad que las partículas más pesadas que circulan por el anillo. Los choques entre los dos tipos de partículas se producen a velocidades térmicas, y en esas colisiones la mayoría de los momentos excedentes se transfieren a los electrones. Como los electrones son unas 2000 veces más livianos que los protones o los antiprotones, pueden enfriar eficazmente por convección. Después de muchas pasadas a través del tramo "refrigerado" del anillo, el haz queda confinado a una menor dispersión de energías y a una sección transversal más estrecha.

El empleo más importante del enfriamiento de haces sería la creación de un anillo de almacenamiento de protones y antiprotones a partir de un gran acelerador de protones, ya sea en el CERN, ya sea en el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), de Illinois. La propuesta para el Fermilab ha sido descrita por David B. Cline, de la Universidad de Wisconsin, y Carlo Rubbia y Peter M. McIntyre, de la Universidad de Harvard. Los antiprotones podrían crearse en choques propulsados por el principal protón sincrotrón del Fermilab, que ahora funciona a una energía variable entre 400 y 500 GeV (miles de millones de electrón-voltios). Los antiprotones con una gama comparativamente amplia de energías se recogerían en un pequeño anillo de almacenamiento, en donde se los obligaría a formar un haz estabilizado, probablemente mediante enfriamiento electrónico. La acumulación de un haz suficientemente intenso tardaría quizá varias horas. Por último, los antiprotones se descargarían de vuelta en el anillo principal, en donde se acelerarían simultáneamente las partículas y las antipartículas. Las colisiones podrían liberar una energía de 800 GeV. Para lograr la misma energía eficaz con protones que choquen contra un blanco fijo se precisarían haces con una energía de 320.000 GeV (miles de millones de electrón-voltios).

¿Qué esperan ver los físicos a 800 GeV? Esa energía corresponde a la temperatura que prevalecía en la materia en los primeros instantes del universo. Se halla lo bastante alejada de los regímenes energéticos que son ahora accesibles como para que pueda confiarse en ninguna previsión. Además, como la materia y la antimateria se aniquilan mutuamente en el choque, quedan muy pocas restricciones *a priori* sobre lo que podría crearse. Una de las posibilidades es que el choque libere un quark, uno de los presuntos constituyentes de los protones y partículas conexas. Pero es más probable que se observe el bosón de vector intermedio, o partícula *W*, que, según se cree, transmite la fuerza nuclear "débil". La partícula *W* ha sido buscada ardientemente durante 10 años como la prueba confirmatoria más importante para una ambiciosa teoría que vincula la fuerza débil y el electromagnetismo. Ahora se admite en general que la masa de *W* está más allá de los aceleradores existentes. Estaría perfectamente dentro del alcance de un anillo almacenador de protones y antiprotones.

Fijación biológica de nitrógeno

Solamente ciertas bacterias y algas inferiores poseen el equipo celular necesario para convertir nitrógeno atmosférico en amoníaco. Son los principales suministradores de este limitado nutriente agrícola

Winston J. Brill

Antoine Laurent Lavoisier dio al nitrógeno el nombre de "azote", "sin vida", aludiendo así a su diferencia del otro componente principal del aire (el oxígeno), que estribaba en no poder sostener el metabolismo de los organismos. Este nombre resultó ser paradójico. El nitrógeno es un constituyente esencial de las proteínas, y hoy sabemos que se necesitan grandes cantidades del mismo para todas las formas de vida. Probablemente, el nitrógeno es el factor limitante más común del crecimiento de las plantas y de los animales; el suministro inadecuado del mismo en la agricultura constituye uno de los factores más importantes de los que contribuyen al hambre humana.

El nitrógeno es, a la vez, un elemento abundante, que compone casi el 80 por ciento de la atmósfera terrestre, y una fuente nutritiva muy escasa. La paradoja se resuelve fácilmente: el nitrógeno atmosférico es inerte, y no pueden aprovecharlo la mayoría de los organismos. El nitrógeno únicamente se incorpora en los sistemas biológicos cuando ha sido "fijado" o combinado con ciertos elementos, como el hidrógeno o el oxígeno. En la actualidad, esta fijación puede verificarse industrialmente a través de la fabricación de amoníaco a partir del hidrógeno y del nitrógeno atmosférico. La síntesis de amoníaco y otros fertilizantes químicos derivados de él implica hoy una industria poderosa, pero casi todo el nitrógeno fijado es de origen biológico.

SUSTANCIA	FORMULA	ESTRUCTURA
NITROGENO MOLECULAR	N_2	
ION NITRATO	NO_3	
AMONIACO	NH_3	
PEPTIDO (SUBESTRUCTURA DE LAS PROTEINAS)	R O —NH—CH—C—	

LA FIJACION DE NITROGENO es la conversión del gas nitrógeno (N_2), prácticamente inerte, en componentes asimilables por los organismos vivos. En la fijación biológica, como también en el proceso industrial de Haber, el producto inmediato es el amoníaco. Los nitratos constituyen otra fuente de nitrógeno fijado, común en el suelo y en los abonos nitrogenados. La mayor parte del nitrógeno que entra en los sistemas biológicos se convierte en proteínas, que son moléculas constituidas por aminoácidos que están unidos por un enlace peptídico entre carbono y nitrógeno.

En la naturaleza, la fijación de nitrógeno es una facultad reservada a unos cuantos géneros de bacterias (entre las cuales hay que incluir ciertas algas azulverdosas, que son un grupo de procariotas que pueden clasificarse dentro del grupo de las bacterias con el nombre de cianobacterias). Ningún organismo superior ha desarrollado esta capacidad, a pesar de que algunos participan indirectamente a través del establecimiento de asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de nitrógeno. La relación mejor conocida de éstas es la que se da entre las plantas llamadas leguminosas y varias bacterias del género *Rhizobium.* Otras bacterias fijadoras de nitrógeno viven asociadas con plantas huéspedes, y muchas viven libres en el suelo o en el agua. Unas son fotosintéticas; otras requieren oxígeno y, otras terceras, solamente pueden vivir en un medio anaerobio o carente de oxígeno. Todos estos organismos disfrutan, al parecer, de un mecanismo común para la fijación de nitrógeno; como en el proceso industrial, el producto inicial es el amoníaco. Comparten además un único enzima: la nitrogenasa. Apenas si acabamos de empezar a comprender la estructura de la nitrogenasa, a conocer su funcionamiento y regulación y a descifrar las características que distinguen a los organismos que la poseen. Los beneficios potenciales de este conocimiento pueden calcularse en términos de un mayor nivel de vida para todo el mundo. El coste de los fertilizantes ha aumentado drásticamente en los últimos cinco años, incidiendo en el ma-

yor coste de los alimentos en los países más ricos y en la restricción del suministro dietético a los países más pobres. Si puede llegar a conocerse la actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno, podrá también mejorarse y, en último extremo, podrá trasladarse a otros organismos, quizás incluso a los cultivos de cereales. El resultado podría ser una menor dependencia de los fertilizantes nitrogenados.

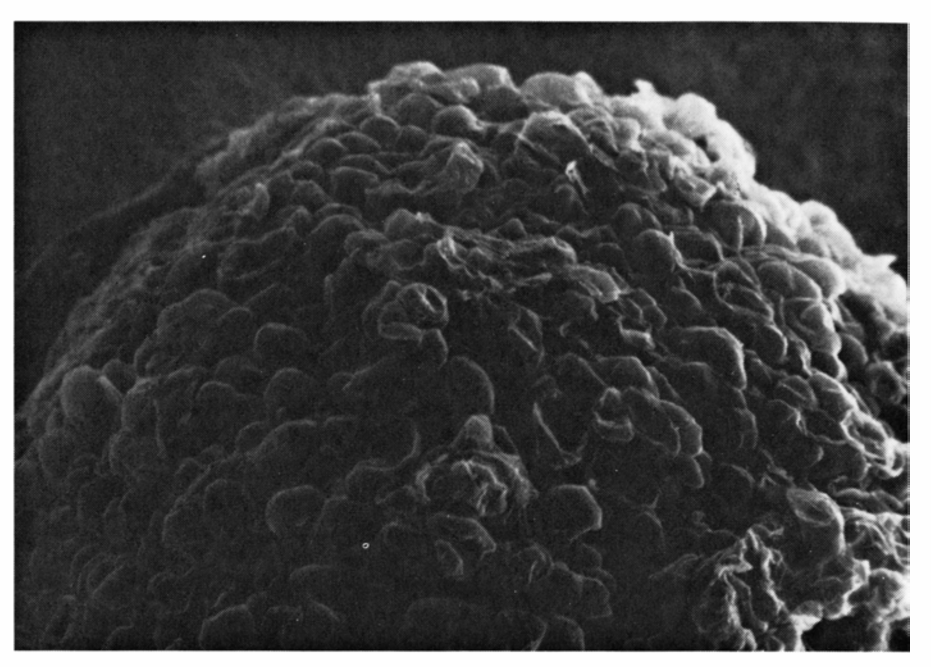
Química del nitrógeno

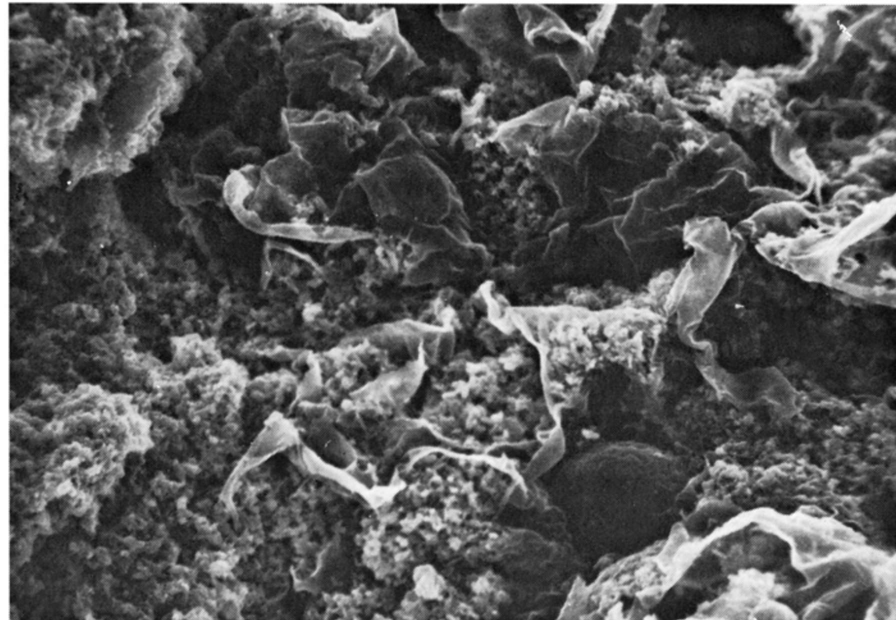
El nitrógeno atmosférico es un gas diatómico, es decir, integrado por moléculas compuestas de dos átomos cada una, denominadas N_2. El nitrógeno molecular es muy inerte, porque el enlace que une a los dos átomos es excepcionalmente fuerte y estable; se trata de un triple enlace al que debe suministrarse una gran cantidad de energía si se quiere romperlo.

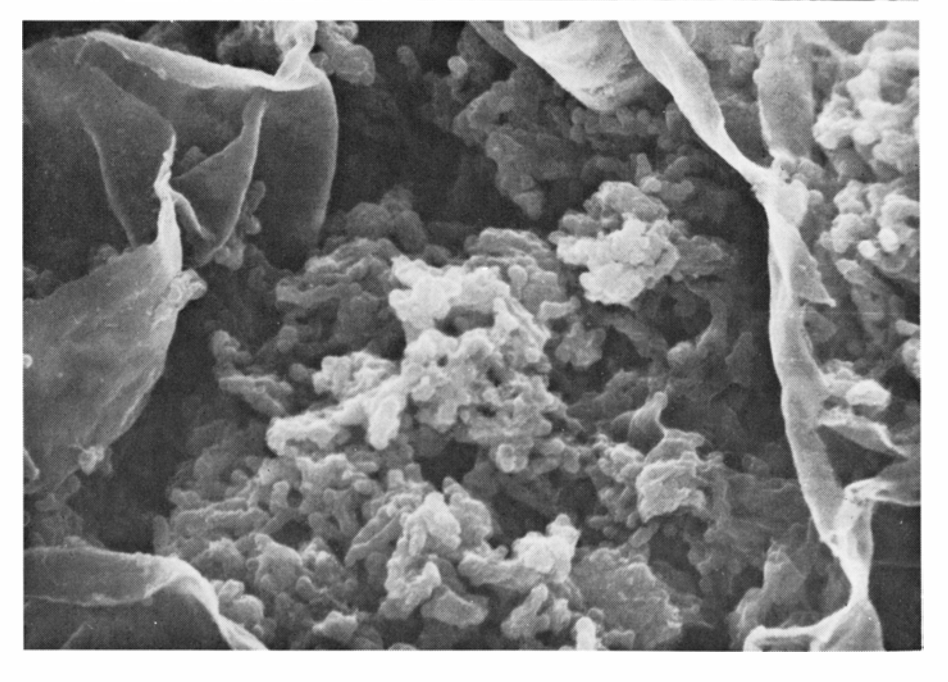
En la fijación industrial, la energía necesaria viene proporcionada por los combustibles fósiles. En el proceso desarrollado en los primeros años del siglo XX por Fritz Haber y Karl Bosch, el nitrógeno atmosférico se combinaba con el hidrógeno a temperatura y presión altas, en presencia de catalizadores que contenían hierro. El producto de la reacción era el amoníaco (NH_3) que era, por sí mismo, un fertilizante eficaz y que podía convertirse en otros compuestos nitrogenados usuales, como la urea y los nitratos.

El coste energético del proceso de Haber aparece inmediatamente al considerar la fuente del hidrógeno requerido; éste se recaba del gas natural o del petróleo. Por cuya razón, el coste de los fertilizantes nitrogenados está íntimamente correlacionado con el coste de los combustibles fósiles.

En el suelo, el nitrógeno, fijado a partir de los fertilizantes industriales o de







EL NODULO RADICAL DE LA SOJA consta de células de vegetal repletas de bacterias fijadoras del nitrógeno. En esta secuencia de fotografías al microscopio electrónico de barrido, hecha en el laboratorio del autor en la Universidad de Wisconsin, se muestra un nódulo radical con un aumento progresivamente mayor. En la fotografía superior aparece la superficie de un pequeño nódulo radical. En la fotografía central se ha cortado el nódulo para mostrar su interior. En la parte inferior se ha aumentado una región de la superficie externa, mostrando una masa densa de bacterias que se vierte fuera de la célula vegetal rota. Las bacterias pertenecen a la especie *Rhizobium japonicum,* que se asocia exclusivamente con la soja; otras plantas de la clase *Leguminosae* contienen especies distintas de *Rhizobium.* Las asociaciones de *Rhizobium* y leguminosas proporcionan el 40 por ciento de todo el nitrógeno fijado por medios biológicos y casi todo el nitrógeno fijado por las plantas cultivadas.

las fuentes naturales, es capturado por las raíces de las plantas y, posteriormente, empleado en la síntesis de moléculas biológicas. La mayoría de éstas se incorporan en la estructura de las proteínas, que son las moléculas versátiles responsables del metabolismo celular. Las proteínas están constituidas por aminoácidos, cada uno de los cuales tiene, como mínimo, un átomo de nitrógeno. Una proteína típica puede estar compuesta de varios centenares de aminoácidos. Elemento estructural imprescindible de la proteína es el enlace peptídico, que une un aminoácido con el siguiente; el enlace conecta un átomo de nitrógeno de un aminoácido con otro átomo de carbono de otro aminoácido.

A través de los desechos vegetales y animales y de los tejidos muertos, el nitrógeno regresa al suelo en donde gran parte del mismo puede reciclarse. Las proteínas se hidrolizan para producir aminoácidos; éstos, posteriormente, suelen degradarse hasta dar amoníaco o nitrato, sustancias que, por último, pueden ser absorbidas de nuevo por las raíces vivas. Sin embargo, en competencia con las raíces vegetales se encuentra una serie de bacterias descomponedoras, las bacterias denitrificantes, que liberan el nitrógeno fijado y lo devuelven en forma de gas diatómico. Las bacterias denitrificantes cierran así el ciclo del nitrógeno por el retorno del elemento a la atmósfera. Como resultado de su actividad, la reserva de nitrógeno fijado en el suelo debe ser rellenada continuamente. La agricultura representa, por su parte, una gran merma en el suministro de nitrógeno fijado; cada vez que se cosecha un cultivo, el nitrógeno que contiene supone una pérdida para el suelo.

Anualmente, se van incorporando a la biósfera pequeñas cantidades de nitrógeno fijado a través de ciertos procesos inorgánicos, como la formación de nitratos en los motores de combustión, en descargas eléctricas y en emisiones volcánicas. Una gran cantidad –cerca de la cuarta parte de la producción total de nitrógeno fijado– es amoníaco sintetizado mediante el proceso de Haber. Las bacterias producen el resto, que se estima en unos 150 millones de toneladas métricas por año.

Leguminosas

La actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno fue aprovechada en beneficio humano siglos antes de que se descubrieran las propias bacterias y el proceso de fijación del nitrógeno. Los agricultores tienen una larga experiencia en el cultivo de leguminosas como la soja, el cacahuete, la alfalfa, las habichuelas, los guisantes y las habas. Estos cultivos pueden revitalizar el suelo, efecto que hoy se considera el resultado de la fijación del nitrógeno por especies de *Rhizobium,* las cuales forman nódulos en las raíces de las leguminosas. Se emplean inóculos comerciales de *Rhizobium* para la siembra de leguminosas con el fin de asegurar que el suelo contenga la bacteria apropiada. Suele plantarse cultivos de leguminosas en rotación con otros de no leguminosas, como el maíz. De este modo, las sustancias nitrogenadas procedentes del cultivo de leguminosas de una estación ayudan a fertilizar el cultivo de cereales de la estación siguiente. Para la obtención de una producción de grano máxima, debe aplicarse además fertilizante industrial, si bien la cantidad necesaria de abono queda menguada.

Los *Rhizobium* penetran en la raíz de la leguminosa a través de un pelo radical, que es una célula de la superficie de la raíz especializada en la absorción. La pared celular del pelo radical se invagina y constituye un tubo de infección que contiene un enjambre de células de *Rhizobium* proliferantes. Muchas de estas infecciones abortan, pero algunas avanzan hacia la base del pelo radical y, por repetición del proceso de invaginación, se introducen en las células corticales de la raíz. El ápice del tubo de infección puede romperse entonces, liberando las bacterias dentro de las células corticales, que determinan luego una dilatación tumoral: el nódulo radical. Este consta de células vegetales grandes, muchas de las cuales se hallan repletas de bacterias. El amoníaco producido por las bacterias se combina con compuestos carbonados derivados de la fotosíntesis de la planta, para producir aminoácidos, que se van incorporando a las proteínas vegetales.

De acuerdo con el alcance del sentido de la expresión "tubo de infección", la introducción de *Rhizobium* en las leguminosas parece un proceso patológico, pero

	BACTERIAS LIBRES				
ORGANISMOS FIJADORES DE NITROGENO	*AZOTOBACTER VINELANDII*	*CLOSTRIDIUM PASTEURIANUM*	*KLEBSIELLA PNEUMONIAE*	*RHODOSPIRILLUM RUBRUM*	*CITROBACTER FREUNDII*
ORGANISMO ASOCIADO	NINGUNO	NINGUNO	VARIOS	NINGUNO	TERME
HABITAT NATURAL	SUELOS AEROBICOS	SUELOS ANAEROBICOS	SUELOS AEROBICOS Y ANAEROBICOS; AGUA; TAMBIEN EN ASOCIACION CON PLANTAS, HOMBRE	SUPERFICIE DE ESTANQUES CONTAMINADOS (BACTERIA FOTOSINTETICA)	TUBO DIGESTIVO DEL TERME

ENTRE LOS ORGANISMOS FIJADORES de nitrógeno se encuentran algunos géneros de bacterias y cianofíceas o algas azul-verdosas. Tales organismos, que se cuentan entre los más simples y, presumiblemente, los más primitivos, se distinguen de los demás por la ausencia

se trata de un proceso en el que coopera la propia planta. La salud de la planta depende de que facilite la infección por *Rhizobium* y excluya la de cualquier otra bacteria, que pudiera ser patógena o parásita. Esta discriminación se verifica a través de un sistema de marcadores químicos que permiten a la planta y a la bacteria reconocerse mutuamente.

A cada leguminosa corresponde, o se encuentra asociada, una especie distinta de *Rhizobium*. La bacteria que forma nódulos en la soja, por ejemplo, no puede infectar a la alfalfa. En 1974, Benjamin B. Bohlool y Edwin L. Schmidt, de la Universidad de Minnesota, descubrieron el primer elemento del mecanismo de reconocimiento responsable de esta especificidad. Identificaron una proteína de la soja que se enlaza con las células de *Rhizobium japonicum*, la especie bacteriana que infecta a la soja, pero no a cualquier otra especie de *Rhizobium*. Frank B. Dazzo y David H. Hubbell, de la Universidad de Florida, hallaron más tarde otra proteína que presenta, por lo que se ve, la misma relación entre el trébol y *Rhizobium trifolii*, siendo ésta la bacteria que infecta la raíz de aquél. A la proteína en cuestión le dieron el nombre de trifolina.

Dazzo continuó su trabajo en el Center for Studies of Nitrogen Fixation de la Universidad de Wisconsin. Recientemente, ha demostrado que la trifolina se encuentra en la superficie de los pelos radicales del trébol, que constituye la zona inicial de la infección. Ha demostrado también que la trifolina se enlaza con un polisacárido de la superficie del *Rhizobium trifolii* infectante, pero no con polisacáridos de otras especies de *Rhizobium*.

Una hipótesis verosímil derivada de estos experimentos es que la trifolina actúa como un puente entre la bacteria y la planta. Estudios posteriores, en los que se ha recurrido a moléculas marcadas de anticuerpos, han suministrado una información preliminar de las zonas en donde la trifolina enlaza la raíz de la planta y la superficie bacteriana. Es interesante observar que las dos zonas de anclaje son antigénicamente similares, es decir, tienen afinidad por las mismas moléculas de anticuerpo. La significación de esta semejanza no está totalmente explicada, pero sí se conocen ciertas analogías; por ejemplo, las superficies de algunas bacterias patógenas se parecen en su estructura a las superficies de células de mamíferos. En virtud de esa semejanza, las defensas del huésped, que normalmente eliminarían a un microorganismo invasor, pueden verse engañadas.

Otras simbiosis

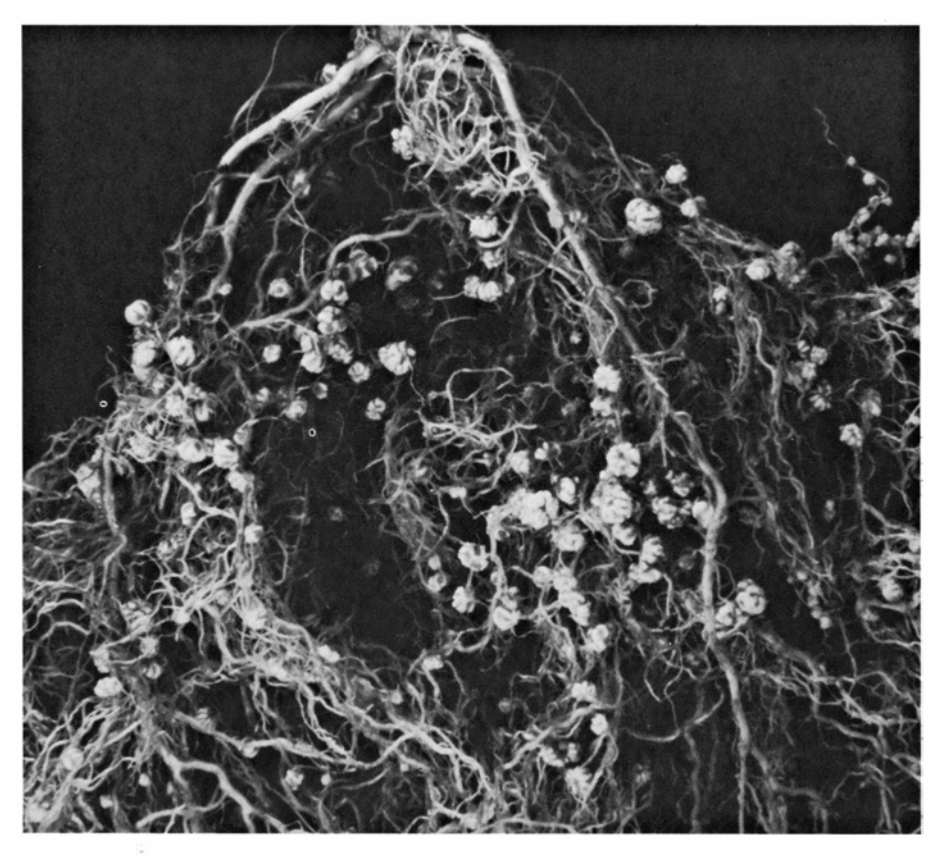
La asociación simbiótica entre las leguminosas y las bacterias del género *Rhizobium* integra el sistema más complejo y desarrollado de fijación biológica del nitrógeno; pero no es el único. Por ejemplo, el aliso, que es una especie maderera común del noroeste de los Estados Unidos, contiene bacterias fijadoras de nitrógeno en nódulos radicales no muy distintos de los nódulos de las leguminosas. Otras simbiosis involucran a un pequeño helecho acuático, *Azolla*, y una cianofícea capaz de realizar la fotosíntesis y la fijación de nitrógeno. Al ocupar las cavidades de los frondes del helecho, la cianofícea suministra nutrientes que le posibilitan al mismo propagarse en un medio acuoso deficiente en nitrógeno fijado. Los agricultores de Vietnam han utilizado las propiedades de las algas apoyando el crecimiento de *Azolla* entre los arrozales sumergidos; el helecho puede crecer también en estanques y ser utilizado como abono rico en nitrógeno.

Johanna Dobereiner, del Instituto de Investigación Agrícola del Brasil, descubrió otra simbiosis aparente, aunque tal vez bastante lábil. Encontró bacterias fijadoras de nitrógeno que vivían asociadas a las raíces de ciertas gramíneas tropicales; por ejemplo, la gramínea *Digitaria* soportaba poblaciones de una bacteria, *Spirillum lipoferum*, reconocida como fijadora de nitrógeno. Esta bacteria no forma estructuras especializadas como son los nódulos, sino que simplemente crece en la superficie de las raíces. No está de más destacar que los cultivos más importantes de cereales, comprendidos el trigo y el maíz, derivan genéticamente de gramíneas tropicales.

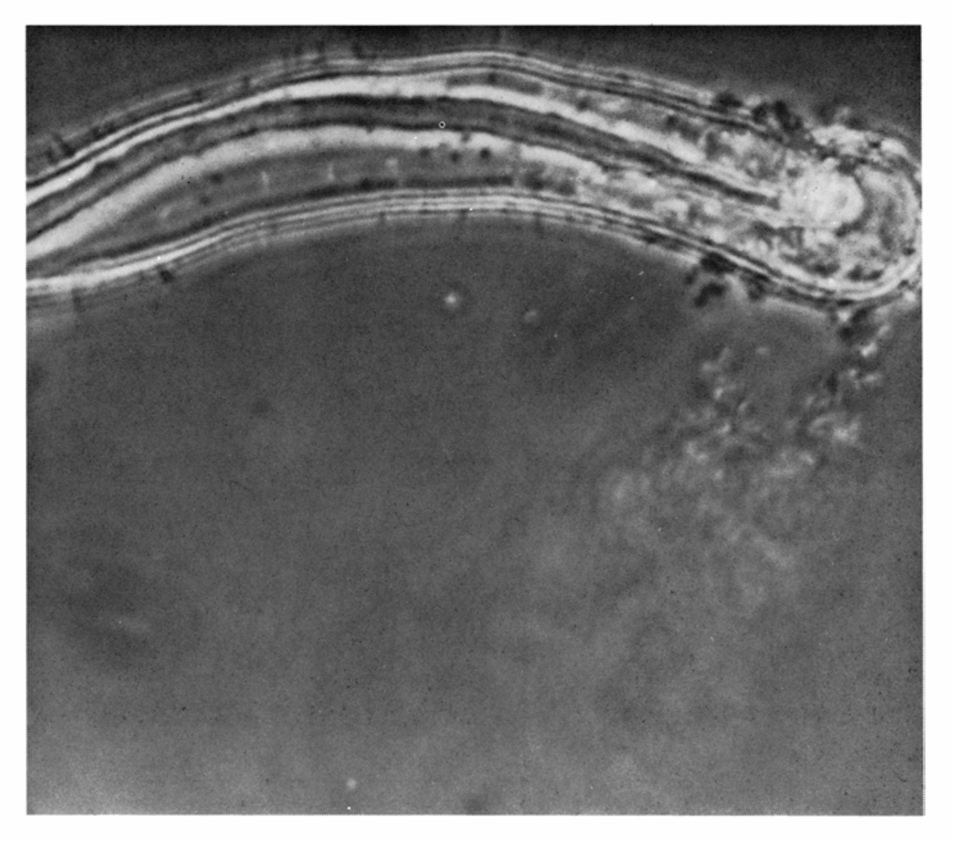
Se registró un interesante hallazgo posterior, cuando un colega de Dobereiner advirtió que, entre las plantas de maíz que crecían en campos deficientes en nitrógeno, unas cuantas eran mayores que las demás. Cuando se acometió el estudio de esas plantas excepcionales,

BACTERIAS SIMBIOTICAS					
NO LEGUMINOSAS			LEGUMINOSAS		
FRANKIA ALNI	*NOSTOC MUSCORUM*	*ANABAENA AZOLLAE*	*RHIZOBIUM JAPONICUM*	*RHIZOBIUM TRIFOLII*	*RHIZOBIUM MELILOTI*
ALISO	*GUNNERA MACROPHYLLA* (HIERBA TROPICAL)	*AZOLLA* (HELECHO ACUATICO)	SOJA	TREBOL	ALFALFA
NODULOS RADICALES DEL ALISO	EN TALLOS; CIANOBACTERIA	EN POROS FOLIARES; CIANOBACTERIA	NODULOS RADICALES DE LA SOJA	NODULOS RADICALES DEL TREBOL	NODULOS RADICALES DE LA ALFALFA

de núcleo celular. Hay formas libres y formas que se desarrollan sólo en asociación simbiótica con plantas superiores y animales; muy pocas pueden adoptar uno u otro modo de vida. Las bacterias que viven en hábitats anaerobios no pueden sobrevivir a la exposición al oxígeno.



LAS RAICES DE SOJA tienen varios nódulos tumorales que resultan de la infección por *Rhizobium.* En esta asociación simbiótica, la planta suministra glúcidos a la bacteria, la cual, a su vez, proporciona a la planta nitrógeno fijado. En las leguminosas, la planta protege también a la bacteria de la exposición al oxígeno que desnaturaliza de manera permanente a la nitrogenasa.



LA INFECCION CON RHIZOBIUM se efectúa a través de los pelos radicales, que son células de la periferia de las raíces. En esta microfotografía, realizada por Frank B. Dazzo, de la Universidad de Wisconsin, muchas bacterias *(objetos flagelados negros)* se adhieren al pelo radical. Las bacterias han conseguido penetrar en la célula a través del tubo de infección, largo conducto que se extiende a través del pelo radical. El tubo de infección se forma por invaginación de la pared celular; la liberación ulterior de la bacteria determina el desarrollo del citado nódulo.

Dobereiner encontró *Spirillum lipoferum* asociado a sus raíces. Ello constituyó un descubrimiento de gran importancia potencial, puesto que implicaba que el maíz podía crecer sin fertilizante si se lograba establecer la asociación bacteria-raíz. Sin embargo, en experimentos subsiguientes realizados en otros laboratorios, con el fin de incrementar la producción de maíz mediante la inoculación con *Spirillum lipoferum,* se cosecharon resultados variables. Se sigue investigando la naturaleza de dicha asociación.

Entre las simbiosis más insólitas se encuentran las que involucran bacterias fijadoras de nitrógeno que colonizan a los termes y a las carcomas. Se sabe ya desde hace tiempo que estos insectos xilófagos, que viven con una dieta exclusiva de madera, poseen microorganismos que segregan enzimas para la digestión de la celulosa. Hoy se ha comprobado que reciben también ayuda dietética de otra población de microorganismos. La madera es una fuente escasa en nitrógeno biológico; las bacterias que viven en el tubo digestivo de los termes y las carcomas proporcionan un suplemento derivado del nitrógeno atmosférico.

Además de los simbiontes obligados, existe cierto número de organismos que fijan nitrógeno cuando viven libres. Algunas cianofíceas, por ejemplo, fijan nitrógeno atmosférico cuando habitan libremente en la superficie de los estanques. En muchos casos, estas algas azules constituyen un perjuicio; el nitrógeno orgánico liberado de las células de las algas muertas favorece el crecimiento de especies acuáticas nocivas y contribuye al proceso llamado eutrofización. Por otro lado, estas mismas algas pueden cultivarse y emplearse como fertilizante o alimento animal.

Existen también bacterias libres que pueden fijar nitrógeno, como sucede con los individuos pertenecientes al género *Clostridium,* que son bacterias anaerobias, es decir, que no pueden desarrollarse en presencia de oxígeno. Otras, miembros de género *Klebsiella,* pueden vivir con o sin oxígeno y se desarrollan como organismos libres o en asociación con plantas y animales. Finalmente, existe el género *Azotobacter,* un grupo de bacterias aerobias cuyo nombre deriva del término que Lavoisier asignó al nitrógeno. Si bien la contribución de estas bacterias libres al suministro total de nitrógeno fijado es, probablemente, modesta, su aportación al estudio de la fijación del nitrógeno ha sido muy grande. Las bacterias libres son organismos muy apropiados para la investigación de la bioquímica de la fijación porque se

eliminan las complicaciones que la simbiosis acarrea consigo.

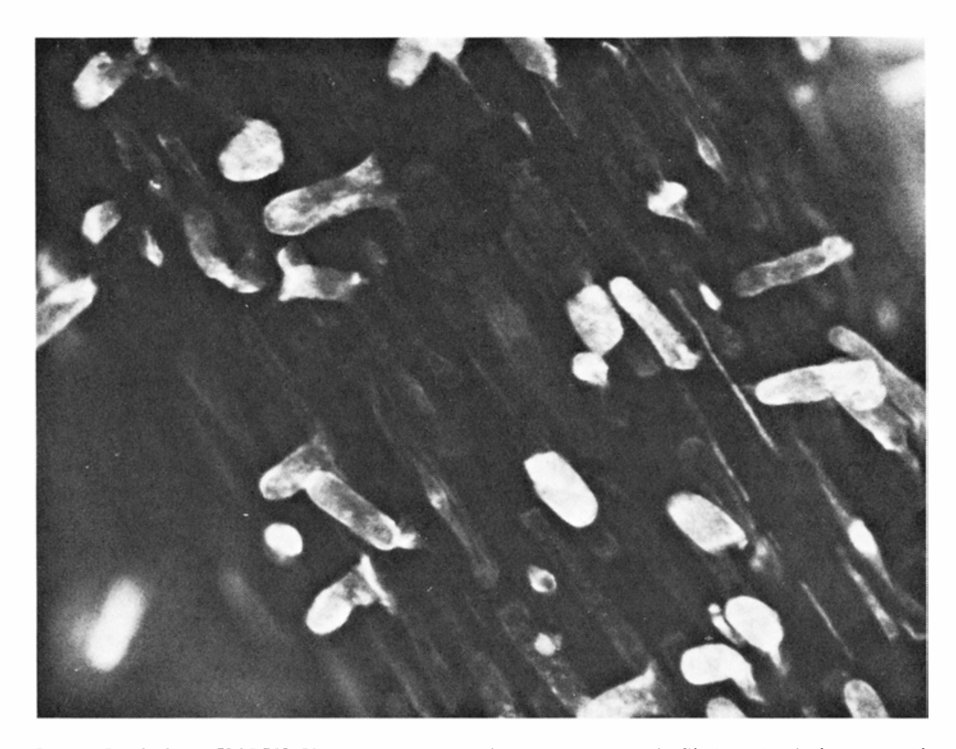
Nitrogenasa

La reacción química completa de la fijación del nitrógeno es la misma cuando se verifica por el proceso de Haber que cuando se realiza en la célula viva. Primero debe romperse el triple enlace de la molécula de N_2; luego deben unirse tres átomos de hidrógeno a cada átomo de nitrógeno. En el proceso de Haber el hidrógeno se presenta en forma de gas molecular; en la mayoría de las bacterias fijadoras de nitrógeno se extrae de moléculas orgánicas como la glucosa, que es el principal azúcar producido en la fotosíntesis. Los átomos de hidrógeno son transferidos de la glucosa al nitrógeno a través de una red de moléculas intermediarias. En realidad, sólo los electrones son los transportados activamente; el medio acuoso de la célula es un mar de protones o núcleos de hidrógeno que son fácilmente proporcionados como complemento de los electrones libres. Una transferencia de electrones entre dos sustancias se llama reacción de oxidación-reducción; se dice que el donador de electrones se ha oxidado por la reacción y que el aceptor se ha reducido. Así, en la fijación del nitrógeno, la glucosa se oxida y el nitrógeno se reduce. Por supuesto, las dos moléculas no interaccionan directamente; la ruta que las conecta es compleja, y algunos de sus segmentos no han sido suficientemente explorados.

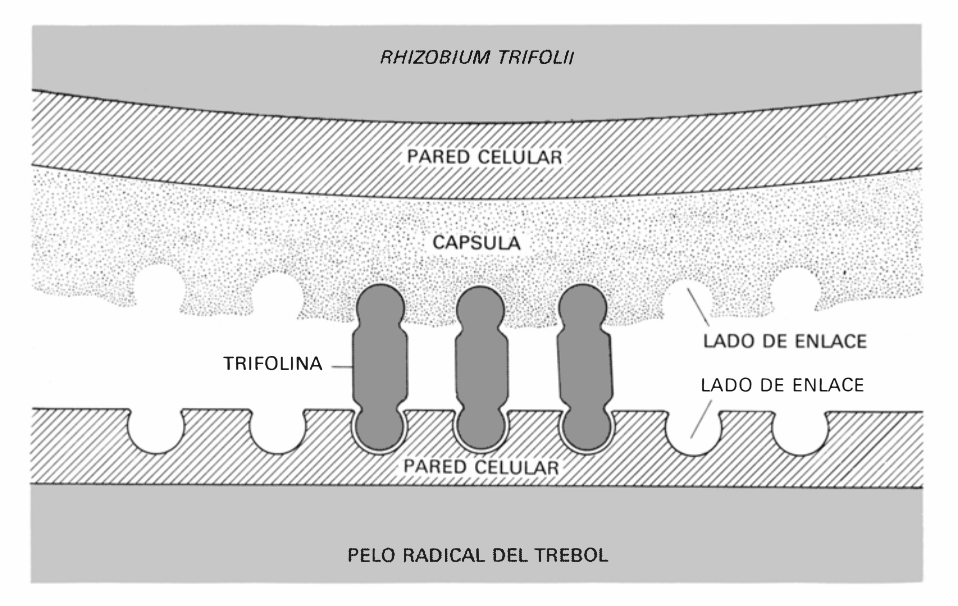
Una de las características más importantes de la reacción de fijación del nitrógeno es la cantidad de energía consumida. Esta energía, que procede del metabolismo de la glucosa o de otros glúcidos, se suministra bajo la forma de adenosintrifosfato (ATP), la fuente universal de energía de la célula. La conversión de una molécula de N_2 en dos moléculas de amoníaco necesita de 12 a 24 moléculas de ATP. Parte de esta energía debe aplicarse para romper el fuerte enlace entre los átomos de nitrógeno, pero se precisa mucho más de lo que un análisis superficial podría sugerir. La explicación correcta de esta ineficacia es que no todo el ATP se invierte en la reducción del nitrógeno; parte del mismo puede consumirse en reacciones competitivas. En cualquier caso, parece que la fijación del nitrógeno significa un alto coste energético para la célula, tal como le sucede al químico industrial.

La molécula clave en la ruta de la fijación del nitrógeno es el enzima nitrogenasa. Todos los organismos que fijan el nitrógeno contienen nitrogenasa, cuya estructura no parece diferir significativamente de una especie a otra. Ningún organismo carente de nitrogenasa puede fijar nitrógeno.

El enzima consta de dos proteínas denominadas Componente I y Componente II. El Componente I tiene un peso molecular de 220.000 unidades de masa atómica y está integrado por cuatro subunidades, cada una de las cuales es una cadena simple de aminoácidos; posee, asimismo, 24 átomos de hierro y 2 átomos de molibdeno. El Componente II tiene un peso molecular de 55.000 unidades de masa atómica, está formado por dos subunidades de proteína y comprende 4 átomos de hierro.



LA RELACION EXCLUSIVA entre una leguminosa y una bacteria fijadora de nitrógeno quedó demostrada por la adhesión de *Rhizobium trifolii* a los pelos radicales del trébol. Se unió primero un colorante fluorescente a los polisacáridos de la cápsula bacteriana, una envoltura amorfa que rodea la pared celular. El polisacárido así marcado se incubó luego con raíces de trébol. La fluorescencia de los pelos radicales del trébol ponía de manifiesto que el polisacárido de la cápsula estaba unido principalmente a ellos. Otros experimentos similares demostraron que las moléculas de polisacáridos de otras especies de *Rhizobium* eran incapaces de unirse a las raíces del trébol.

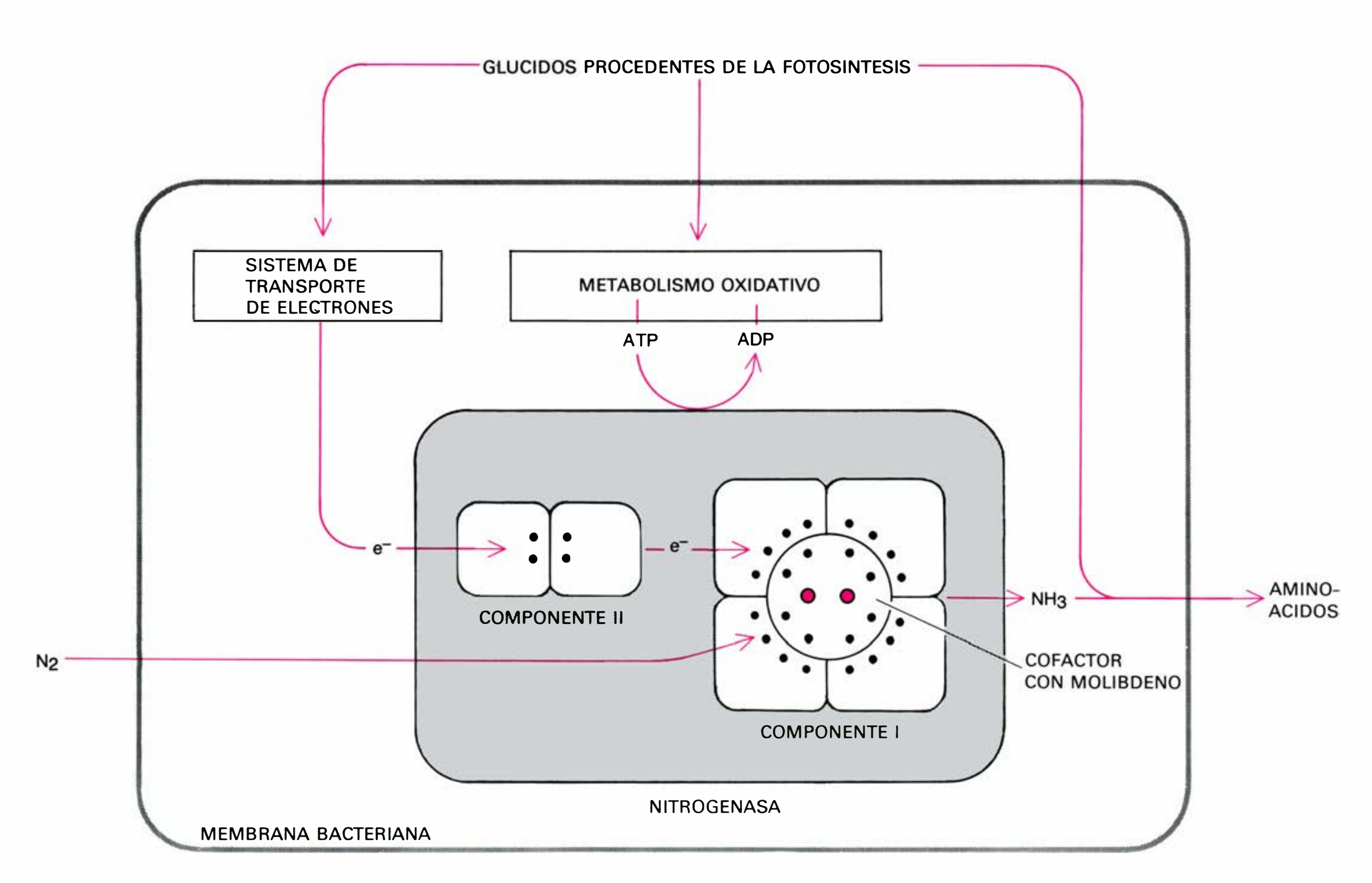


EL RECONOCIMIENTO DE LA RHIZOBIUM por parte de una leguminosa se efectúa, al parecer, mediante una proteína que enlaza la bacteria con el pelo radical. En el caso del trébol, se la ha denominado trifolina. Los lados de enlace para la trifolina en la pared celular de la planta y en la cápsula bacteriana están relacionados antigénicamente; todo hace pensar que poseen una estructura similar. Una interpretación de este descubrimiento sorprendente es que el lado de enlace bacteriano se desarrolló imitando a la planta; esta semejanza ha ayudado a vencer los recursos que normalmente desarrolla la planta para defenderse contra la invasión de organismos extraños.

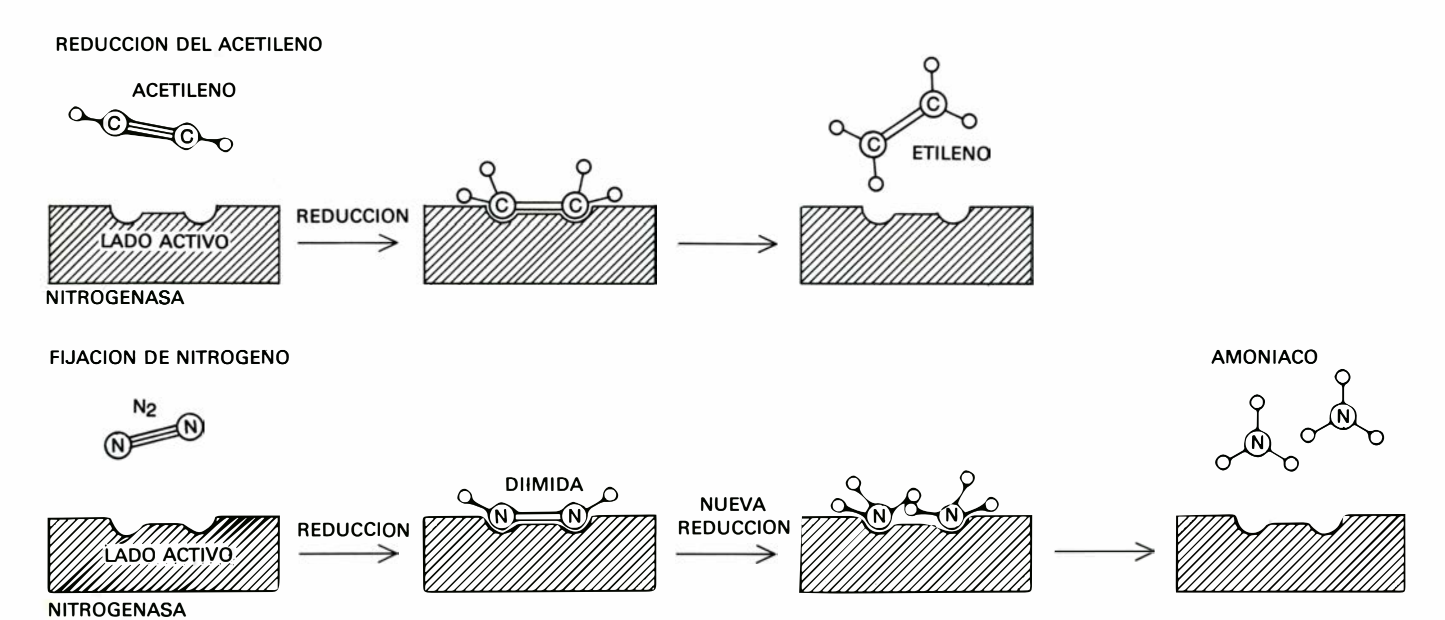
Apenas se conoce gran cosa acerca de cómo esta matriz de proteínas y átomos metálicos se ensambla para constituir el enzima. Mediante el análisis por difracción con rayos X quizá se logre, con el tiempo, discernir la estructura de toda la molécula. Mientras tanto, unos métodos menos directos han proporcionado alguna información sobre los ambientes químicos de los diversos átomos metálicos. Tal vez no sea ninguna coincidencia el que los catalizadores más eficaces en el proceso de Haber sean metales de transición como el hierro y el molibdeno. En la nitrogenasa, el papel desempeñado por los dos átomos de molibdeno resulta fascinante, porque parecen formar parte del lado activo del enzima. El molibdeno no está enlazado con las proteínas del Componente I, sino a un pequeño cofactor; la identificación de éste se debe a Vinod K. Shah, que trabajaba a la sazón en mi laboratorio de la Universidad de Wisconsin. Un sorprendente avance, muy reciente, ha sido el descubrimiento de que este cofactor contiene también alguno de los átomos de hierro asociado con el Componente I. La molécula aislada por Shah puede reactivar la fijación de nitrógeno en una cepa de bacterias que carecen de cofactor. Edward I. Stiefel, del Charles F. Kettering Research Laboratory, ha señalado que entre todos los metales que se encuentran en enzimas, el molibdeno es el único capaz, en los estados de mayor y menor oxidación, de transferir dos electrones y dos protones, y que ésta puede ser su función en el enzima nitrogenasa. Muy pocos enzimas contienen molibdeno; uno de ellos, de interés especial, es la nitratorreductasa, un enzima necesario a las plantas para la conversión de los nitratos en aminoácidos.

Gran parte de los avances logrados en los últimos quince años en la bioquímica de la fijación del nitrógeno se debe a dos técnicas experimentales de importancia nada común. Una de estas técnicas es el ensayo de la reducción del acetileno. En 1965, Robert Schöllhorn y Robert H. Burris, de la Universidad de Wisconsin, y Michael J. Dilworth, de la Universidad de Murdoch, Australia, descubrieron que el gas acetileno inhibía la actividad de la nitrogenasa. Experimentos posteriores demostraron que este enzima reducía el acetileno (C_2H_2) a otro gas, el etileno (C_2H_4). La actividad de la nitrogenasa pudo valorarse incubando simplemente un organismo con acetileno y midiendo después la producción de etileno por cromatografía de gases. En los primeros métodos para estimar la fijación de nitrógeno se usaban isótopos trazadores de nitrógeno o se medía el incremento del contenido de nitrógeno de un organismo, procedimiento muy lento. El ensayo de reducción de acetileno era rápido y preciso.

La otra mejora en los métodos experimentales fue la creación de un sistema para observar la fijación del nitrógeno *in vitro*, es decir, en ausencia de células vivas. Se preparan extractos de células



LA BIOQUIMICA DE LA FIJACION supone la transferencia de átomos de hidrógeno de los glúcidos al nitrógeno. El responsable de la transferencia es el enzima nitrogenasa, proteína compleja que consta de dos componentes principales. El componente menor, Componente II, posee dos subunidades y contiene cuatro átomos de hierro en total. El componente mayor, Componente I, consta de cuatro moléculas de proteína con 24 átomos de hierro; posee también un pequeño cofactor que contiene dos átomos de molibdeno. Vinod K. Shah, en el laboratorio del autor, ha demostrado recientemente que el cofactor posee también alguno de los átomos de hierro del Componente I. Para transferir átomos de hidrógeno basta un transporte activo de electrones; los protones, o núcleos de hidrógeno, pueden soltarse y capturarse libremente a través del medio acuoso de la célula. Los electrones procedentes de los glúcidos son donados primero al Componente II y luego al Componente I, en donde ocurre la verdadera reducción del nitrógeno. El funcionamiento de ambos componentes requiere energía, que se proporciona en forma de adenosíntrifosfato (ATP). El mecanismo de síntesis de amoníaco es, según parece, el mismo en todas las especies fijadoras de nitrógeno, aunque, en las bacterias fotosintéticas, los electrones y el ATP quedan transferidos directamente al enzima nitrogenasa.



SECUENCIA HIPOTETICA de sucesos en la fijación de nitrógeno. Se supone que todos los estadios intermedios permanecen unidos a la nitrogenasa. La secuencia se basa, en parte, en el mecanismo supuesto para el ensayo de la reducción del acetileno, una prueba de la actividad de la nitrogenasa. En ausencia de nitrógeno, la nitrogenasa convierte el acetileno en etileno; se reduce un triple enlace a un doble enlace y se añaden dos átomos de hidrógeno. Por su tamaño y por la presencia del triple enlace, el nitrógeno molecular se parece al acetileno; de ahí que sea lógico suponer que la nitrogenasa actúe de forma similar sobre las dos moléculas. Si ello sucede así, uno de los compuestos intermedios de la fijación del nitrógeno podría ser una molécula llamada diimida. Cuando se utiliza acetileno como substrato de la nitrogenasa, la reducción se detiene tras el primer paso, y el producto liberado es el etileno. La acción del enzima sobre el nitrógeno es distinta; cada átomo de nitrógeno se reduce tres veces, adquiriendo tres electrones, y convirtiéndose en molécula de amoníaco. Este mecanismo propuesto es meramente hipotético, ya que el lado activo de la nitrogenasa aquí mostrado es convencional; aún se sabe muy poco acerca de su verdadera estructura.

bacterianas en los que no se destruye la nitrogenasa, pero en los que el enzima generalmente no puede funcionar por no estar asociado a la "maquinaria" celular. A principios de la década de los sesenta, se descubrió que ciertos extractos libres de células podían fijar nitrógeno si se añadía pequeñas cantidades de ATP junto con un fuerte agente reductor como el ditionito sódico. Con tal sistema, la fijación *in vitro* de nitrógeno se convierte en un proceso de laboratorio que puede manipularse y medirse con facilidad.

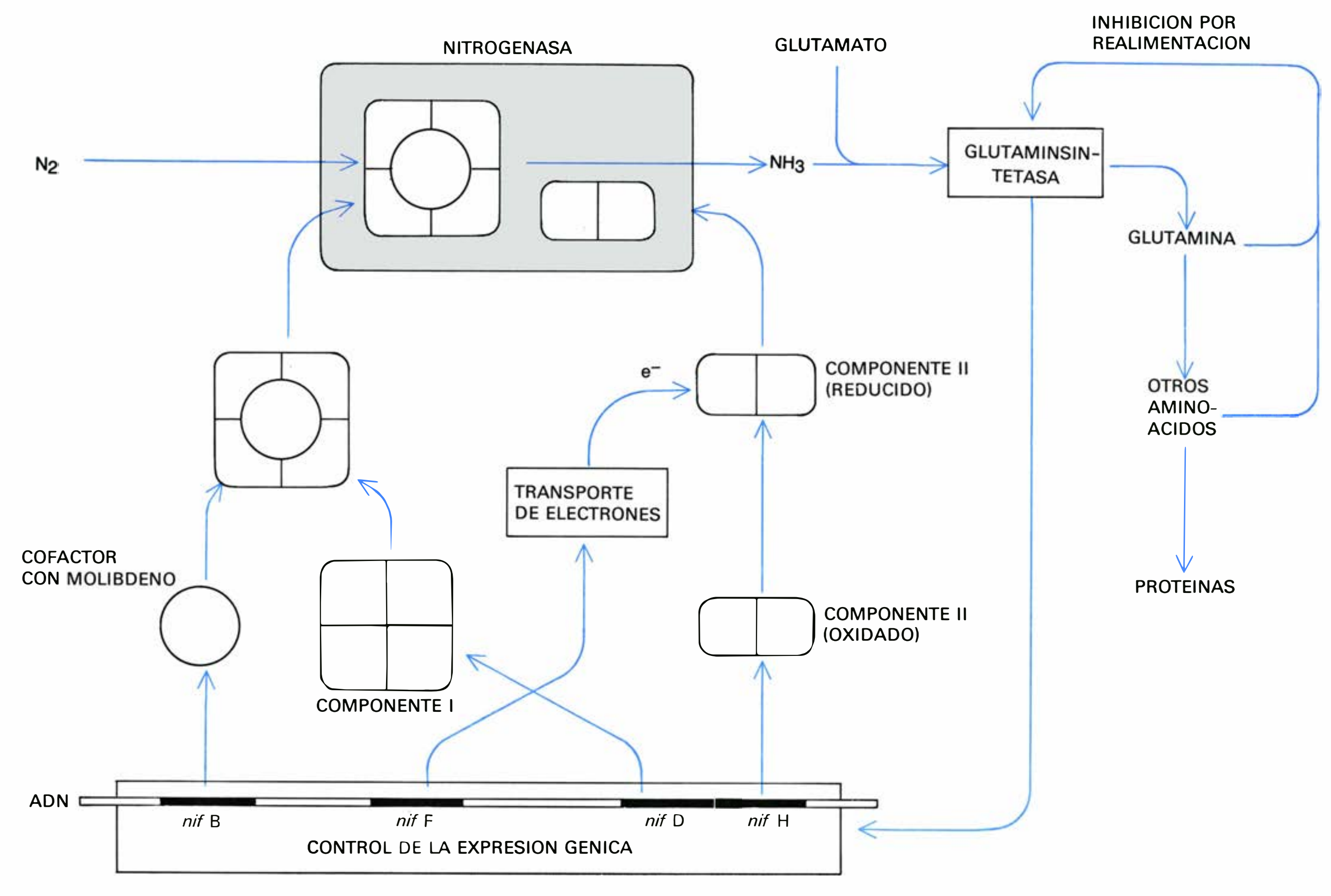
¿Cuáles han sido los progresos realizados en la comprensión de la bioquímica de la nitrogenasa? El estado actual de la cuestión ha sido resumido en distintas publicaciones recientes por William H. Orme-Johnson, de la Universidad de Wisconsin, Leonard E. Mortenson, de la Universidad de Purdue, y Barry E. Smith y sus colegas, de la Universidad de Sussex. Han demostrado que el primer suceso, en la secuencia que conduce a la fijación, es la reducción del Componente II del enzima por una proteína transportadora de electrones externa a la nitrogenasa. El Componente II reducido reacciona con el ATP y reduce luego al Componente I. Finalmente, el Componente I reduce al nitrógeno molecular formando amoníaco al cabo de cierto tiempo. La misma secuencia de acontecimientos puede describirse de otro modo. El Componente II acepta primero un electrón de un transportador proteínico; el electrón se transfiere luego al Componente I y, por último, al nitrógeno. No se han descubierto sustancias intermedias entre el nitrógeno y el amoníaco, por lo que todos los estadios intermedios deben permanecer enlazados con la nitrogenasa. Existen pruebas que corroboran la suposición intuitiva de que los electrones se transfieren mediante los átomos de hierro y molibdeno, pero se desconoce cuál es el mecanismo íntimo de la transferencia.

El suceso final de esta secuencia –la verdadera reducción del nitrógeno– es, a la vez, el más interesante y el más frustrante. Es probable que no lleguemos a comprender el proceso detalladamente hasta que no se haya determinado la estructura del lado activo de la nitrogenasa. Una hipótesis afirma que uno de los estadios intermediarios enlazado es una diimida, una molécula con la estructura HN = NH. En otras palabras, se supone que al menos un átomo de hidrógeno se enlaza a cada nitrógeno antes de que el enlace entre los átomos de nitrógeno se rompa por completo. Existe una sorprendente simetría entre este proceso y el mecanismo presunto por el cual la nitrogenasa reduce el acetileno a etileno, pero hay pocas pruebas que lo afirmen o rechacen.

Reacciones competitivas

El desarrollo *in vitro* de sistemas de nitrogenasa posibilitó el descubrimiento del peculiar comportamiento del enzima en ausencia de su substrato. Cuando se suministra ATP a la nitrogenasa, en ausencia de nitrógeno, se desprende hidrógeno. Según parece, el transporte de electrones al enzima se desarrolla normalmente en ausencia de nitrógeno; cuando los electrones llegan al lado activo del enzima, se recombinan con los protones. En efecto, incluso en la atmósfera normal, algunos electrones y parte del ATP parecen gastarse en la formación de hidrógeno. Karel Shubert y Harold J. Evans, de la Universidad estatal de Oregón, determinaron que la mayoría de las asociaciones *Rhizobium*-leguminosas desperdiciaban cerca de la mitad de los electrones que llegaban a la nitrogenasa. Calcularon que los cultivos de soja de los Estados Unidos producían anualmente un volumen de hidrógeno gaseoso con una energía equivalente a 8500 millones de metros cúbicos de gas natural. Obviamente, la eficiencia de la fijación podría ser mejorada si se eliminara la producción parásita de hidrógeno. Un hallazgo alentador es que, al menos, dos simbiosis –las correspondientes al fríjol chino y al aliso– no pierden electrones para formar hidrógeno gaseoso. Con toda probabilidad, el hidrógeno se produce en ellos, como en los demás organismos fijadores, en el lado activo, pero se recicla antes de que pueda escapar de la célula.

Alternativa a la supresión de la producción de hidrógeno es su aprovechamiento. Por ejemplo, las algas azules cultivadas en estanques podrían conver-



EL CONTROL DE LA FIJACION DEL NITROGENO se verifica, al parecer, por la regulación de unos genes, denominados *nif*, que codifican la nitrogenasa. La molécula reguladora es un enzima, la glutamínsintetasa. El amoníaco producido por la fijación de nitrógeno se combina con el glutamato para formar el aminoácido glutamina. Se sintetizan luego otros aminoácidos por modificación de la glutamina. Se ha demostrado que una elevada concentración de ciertos aminoácidos inhibe la glutaminsintetasa. De esto se deduce que la actividad del enzima sirve también para medir las necesidades de la célula en relación a la fijación del nitrógeno. En confirmación lógica de este supuesto, el enzima glutaminsintetasa parece regular la tasa de fijación, indirectamente, a través de la activación o la desactivación de los genes llamados *nif*.

tir la energía solar, a la vez, en nitrógeno fijado e hidrógeno libre. La dificultad mayor estribaría en recoger el hidrógeno.

Una particularidad de todos los sistemas nitrogenasa es que los dos componentes proteínicos del enzima se desnaturalizan por contacto con el oxígeno. El envenenamiento por oxígeno es irreversible; la actividad del enzima no puede ser restaurada, ni siquiera eliminando el oxígeno o añadiendo agentes reductores fuertes. Esta sensibilidad al oxígeno perturba al biólogo investigador de la nitrogenasa, ya que todos sus aparatos experimentales deben ser diseñados para excluir el oxígeno; al parecer los organismos fijadores de nitrógeno se enfrentan con este mismo y difícil problema. En efecto, estos organismos han ido adoptando una diversidad de estrategias para proteger sus enzimas.

El problema de los enzimas oxigenolábiles es trivial para las bacterias anaerobias fijadoras de nitrógeno. Para estos organismos, el oxígeno es siempre un gas tóxico; por ello viven en los ambientes carentes de oxígeno, como en las capas más profundas del suelo. La bacteria *Klebsiella pneumoniae* puede crecer con o sin oxígeno en presencia de amoníaco o nitrato; sin embargo, puede vivir con nitrógeno atmosférico sólo en un medio carente de oxígeno; según parece, la bacteria no dispone de recursos para proteger su nitrogenasa de la desactivación.

Muchas algas azules que fijan el nitrógeno tienen células especializadas con paredes celulares gruesas, llamadas heterocistos, que contienen la nitrogenasa. Presumiblemente, los heterocistos aíslan el enzima del oxígeno atmosférico. Las bacterias que fijan el nitrógeno en un hábitat aerobio han desarrollado otro medio de defensa. Poseen enzimas que reducen el oxígeno a agua en cuanto penetra en la célula.

La barrera más compleja que se opone al oxígeno es la que se encuentra en las simbiosis *Rhizobium*-leguminosas. El oxígeno es atrapado, antes de que alcance a las bacterias, por una proteína que se enlaza con él, la leghemoglobina, que se sintetiza en el tejido vegetal de los nódulos radicales.. Es la única forma de hemoglobina que se halla en el reino vegetal; se asemeja a las hemoglobinas animales, más conocidas, en su capacidad de enlazarse continuamente con el oxígeno y de suministrarlo cuando se le pide. A consecuencia de esto, *Rhizobium* puede adoptar un metabolismo aerobio eficaz, mientras protege a su nitrogenasa del oxígeno. Esta colaboración puede ser uno de los principales beneficios de la bacteria en su modo simbiótico de vida. En su más amplio contexto, es posible que la labilidad de la nitrogenasa al oxígeno, junto con la gran cantidad de energía requerida para su actividad, sea el motivo por el cual la fijación del nitrógeno se limita a pocas especies.

Regulación de la nitrogenasa

El gran requerimiento energético del proceso de fijación biológica del nitrógeno condiciona que los organismos no fijen nitrógeno, si no lo pide su crecimiento. Este es realmente el comportamiento observado; si existe nitrógeno fijado en el medio bacteriano, se suprime la producción de amoníaco. El fertilizante aplicado a los cultivos de leguminosas reduce el número de nódulos radicales y, por consiguiente, la cantidad de nitrógeno fijado por *Rhizobium*.

La capacidad de respuesta de la bac-

teria ante el nitrógeno fijado en el medio ambiente implica que el sistema de fijación esté bajo control metabólico. Se ha podido establecer cuál es el mecanismo básico de control; el nitrógeno fijado suprime fijaciones posteriores deteniendo la síntesis de nitrogenasa. Como en otros muchos sistemas biológicos, el control se verifica por represión de la expresividad génica. La regulación de la nitrogenasa ha sido estudiada con gran detalle en *Klebsiella pneumoniae;* en esta bacteria, la molécula crucial en la ruta reguladora es un enzima denominado glutamínsintetasa.

En varias especies bacterianas, la glutamínsintetasa participa en aspectos importantes del metabolismo nitrogenado. Su función principal es catalizar la primera fase de la síntesis de aminoácidos. El amoníaco, tanto si procede de la fijación del nitrógeno como si proviene de cualquier otro proceso, entra primero en la ruta bioquímica reaccionando con el glutamato, que es un aminoácido, para formar otro aminoácido, la glutamina; la glutamínsintetasa cataliza dicha reacción. La mayor parte del resto de los aminoácidos se constituye por transferencia de nitrógeno de la glutamina a otros componentes. Boris Magasanik y sus colegas, del Instituto de Tecnología de Massachusets, han observado que, también en bacterias que no fijan el nitrógeno, la glutamínsintetasa regula igualmente la síntesis de enzimas que degradan ciertos substratos nitrogenados.

La glutamínsintetasa es regulada, a su vez, mediante inhibición por realimentación, por algunos productos finales de la síntesis de aminoácidos. Las altas concentraciones de glutamina o de algunos otros aminoácidos disminuyen la actividad del enzima y, por consiguiente, suprimen la producción de nuevos aminoácidos. Es fácil imaginar un mecanismo posible de interrelación: la fijación puede ser facilitada por la presencia de glutamínsintetasa activa mientras existe una deficiencia relativa de productos finales que contienen nitrógeno, es decir, de aminoácidos. La inactivación de la glutamínsintetasa, por otro lado, suprimiría la fijación, dado que el enzima se inactivaría cuando los aminoácidos fueran abundantes.

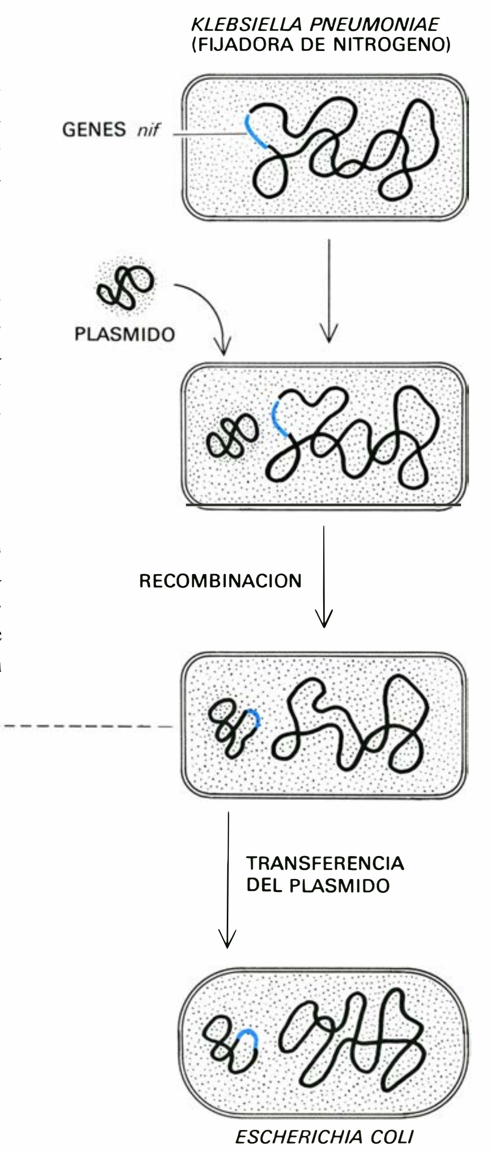
Esta hipótesis pareció confirmarse mediante estudios de cepas mutantes de *Klebsiella pneumoniae* con genes defectuosos para la síntesis de glutamínsintetasa. Estas cepas no sintetizaban nitrogenasa, con lo que se daba a entender que la glutamínsintetasa debía realizar una función clave en la regulación de la síntesis de la nitrogenasa en estos organismos. No ha podido comprenderse, sin embargo, cómo un enzima controla exactamente la síntesis de otro. Lo que es más, ahora se sabe que el mecanismo regulador de la *Klebsiella pneumoniae* es todavía más complejo, ya que tanto el molibdeno como el oxígeno influyen en la síntesis de nitrogenasa.

La regulación de la síntesis de la nitrogenasa en otras bacterias libres ha sido estudiada a través de experimentos con una sustancia estructuralmente parecida al glutamato. Este análogo del glutamato, la metioninasulfoximina, es un poderoso inhibidor de los enzimas que participan en el metabolismo del amoníaco. Un medio de cultivo bacteriano que contenga amoníaco inhibe ordinariamente la síntesis de nitrogenasa. Joyce K. Gordon, en mi laboratorio, ha demostrado que el amoníaco no impide la fijación de nitrógeno en presencia de metioninasulfoximina. Cuando una bacteria crece con este análogo del glutamato, acumula altas concentraciones de nitrogenasa e incluso excreta amoníaco. Una respuesta similar ha sido observada en diversos tipos de bacterias, incluyendo las cianofíceas y otras bacterias fotosintéticas. Estos resultados concordantes prueban que todas las células regulan la síntesis de nitrogenasa a través de algún enzima que participa en la asimilación del amoníaco o a través de los aminoácidos producidos por tal enzima.

Mayor rendimiento

A pesar de que nuestra comprensión de la fijación biológica de nitrógeno está lejos aún de ser exhaustiva, no es presuntuoso pensar en mejorar los métodos de la naturaleza. En la actualidad podrían practicarse algunos métodos para incrementar la fijación y, respecto de los enfoques más radicales, queda al menos claro qué es lo que debe aprenderse y lograrse.

Entre los métodos inmediatos para incrementar la producción de nitrógeno biológico, se halla la mejora de la eficiencia de la asociación *Rhizobium*-leguminosas. Sin embargo, el modo más simple para lograr esto es la selección genética de plantas y bacterias, a fin de determinar las combinaciones que funcionan mejor en un determinado ambiente. El desarrollo del ensayo de la reducción del acetileno permite una rápida selección de las plantas en razón de su capacidad para fijar el nitrógeno.



LA TRANSFERENCIA DE GENES de una bacteria fijadora de nitrógeno a algún otro organismo, verbigracia, una planta cultivada, ofrece el medio más espectacular para incrementar el suministro mundial de nitrógeno fijado. Se ha logrado ya una primera etapa en esta transferencia. Los genes *nif* de *Klebsiella pneumoniae* se incorporaron a un plásmido, que es un segmento de ADN extracromosómico, y se implantaron en *Escherichia coli,* una enterobacteria que no tiene nitrogenasa. Una transferencia similar a las células de plantas superiores resultaría, sin embargo, mucho más difícil. De todos modos, la posesión de los genes *nif* no podría por sí misma asegurar que la planta fijara nitrogenasa. Las *Escherichia coli* provistas de genes *nif,* por ejemplo, pueden sintetizar el enzima nitrogenasa, pero no fijar nitrógeno, porque no se protege al enzima de la acción del oxígeno. La posibilidad de un cereal fijador del nitrógeno parece, pues, todavía remota.

Siguiendo esta técnica, Robert Maier, estudiante graduado de mi laboratorio, aisló una cepa mutante de *Rhizobium japonicum,* la bacteria de los nódulos de la soja, que fija nitrógeno, en los ensayos de laboratorio, en mayor cantidad que sus congéneres silvestres. Quisimos saber si esta bacteria mutante tendría también una eficiencia superior en el campo. A menudo resulta difícil introducir una nueva cepa de *Rhizobium* en un campo cultivado, dada la competencia con las bacterias ya presentes en él, y, por ello, esta bacteria fue inoculada en una parcela del campo de la Universidad de Hawaii que estaba libre de especies de *Rhizobium* productoras de nódulos en la soja. Este vegetal se inoculó, pues, con el mutante y con las cepas parentales; en las experiencias preliminares se obtuvo mayores producciones con el mutante. Sin embargo, permanece el problema de la competencia con las bacterias indígenas, si estas "supercepas" se adoptan en gran escala. Una solución posible sería introducir los genes responsables de la mejor fijación en las cepas que ya tienen más exito en el campo.

El vigor y la eficiencia de las plantas huésped, en el caso de las leguminosas, inciden de una manera poderosa en la cantidad de nitrógeno fijado. Ralph W. F. Hardy y sus colegas, de la E. I. du Pont de Nemours and Company, observaron que la adición de dióxido de carbono gaseoso a pequeñas parcelas de soja mejoraba bastante el rendimiento en fríjoles; y ello, presumiblemente, porque había una mayor producción de glúcidos por fotosíntesis. Más aún, se halló que la fijación de nitrógeno proseguía a tasas más altas y continuaba por más tiempo en el ciclo vital de la planta. No resulta práctico abonar los campos agrícolas con dióxido de carbono, pero se puede lograr el mismo efecto mediante la hibridación de plantas con una eficiencia fotosintética más alta.

Otra mejora en la eficiencia podría lograrse mediante la selección de asociaciones *Rhizobium*-leguminosa que no disipen la energía fotosintética a través de la emisión de hidrógeno. Como he mencionado se conocen dos plantas con esta característica: el fríjol chino y el aliso. Quizá sea posible transferir cualquiera de los mecanismos supresores de la producción de hidrógeno desde estas especies a otras plantas de cultivo más interesantes.

Las asociaciones *Rhizobium*-leguminosa son responsables de casi el 40 por ciento del nitrógeno fijado por medios biológicos y, prácticamente, de todo el nitrógeno fijado por las plantas cultivadas. Las mejores perspectivas para un mayor rendimiento inmediato en el suministro de nitrógeno biológico, ciertamente, se hallarán entre estos organismos. Existen más de 10.000 especies de *Leguminosae,* de las cuales sólo un 10 por ciento, aproximadamente, han sido estudiadas en cuanto a su nodulación. No llegan a 50 especies las cultivadas. Es muy posible que en este grupo existan otras plantas susceptibles de explotación en el ámbito de la agricultura.

Otra vía para incrementar el suministro de nitrógeno consiste en la manipulación de los mecanismos bioquímicos que regulan la fijación de las bacterias. Por ejemplo, Gordon ha aislado cepas mutantes de *Azotobacter* que continúan fijando nitrógeno e incluso excretan amoníaco en presencia de abonos nitrogenados. Tales bacterias podrían ser cultivadas en estanques con un substrato carbonado orgánico de bajo coste, como los desechos de la industria del papel. Si se dispusiera de cepas excretoras de amoníaco en algas azul-verdosas, podría incluso eliminarse el carbono orgánico, ya que la fotosíntesis suministraría los glúcidos. El contenido de los estanques podría recolectarse como fertilizante.

Podrían también adaptarse bacterias excretoras de amoníaco a vivir en el suelo, en las proximidades de las raíces de plantas tales como el trigo y el maíz. Quizá podría constituirse una simbiosis artificial entre variedades seleccionadas de plantas cuyas raíces exudaran sustancias ricas en carbono que nutrieran así a las bacterias. Estas, a su vez, enriquecerían el suelo con nitrógeno fijado.

La alteración del mecanismo regulador bacteriano podría beneficiar también a las leguminosas. Si unas especies de *Rhizobium* pudieran hacerse insensibles a la concentración de amoníaco, los cultivos de leguminosas podrían suministrar al suelo más nitrógeno fijado, en lugar de disminuir el que ya posee.

Manipulación genética

El programa más ambicioso para incrementar la producción de nitrógeno se basa en la modificación genética y, particularmente, en la transferencia de genes de un organismo a otro. En la bacteria *Klebsiella pneumoniae* ha podido hacerse un mapa genético de un gran número de los genes que participan en la fijación (los genes *nif*), en el laboratorio de Raymond C. Valentine, de la Universidad de California, en Davis, y en mi laboratorio. Estos genes se hallan agrupados en una pequeña región del cromosoma bacteriano.

Ray A. Dixon y John R. Postgate, de la Universidad de Sussex, han transferido el grupo de genes *nif* de *Klebsiella pneumoniae* a otra bacteria, *Escherichia coli,* un organismo favorito de los biólogos, habitante común del tracto digestivo humano. La transferencia fue realizada por primera vez incorporando los genes *nif* a un plásmido, que es un fragmento de ADN extracromosómico, e introduciendo luego el plásmido dentro de las células de *Escherichia coli.* Esta bacteria no es fijadora de nitrógeno. La nueva cepa creada por adición del plásmido puede sintetizar nitrogenasa y también fijar nitrógeno, si se la protege del oxígeno.

El éxito de este experimento provocó una emoción justificable. Abre la posibilidad de crear una planta de trigo o maíz capaz de fijar independientemente el nitrógeno atmosférico, por transferencia genética posterior. Aunque tal posibilidad resulta, hay que subrayarlo, bastante remota. En efecto, sólo se han transferido unos pocos genes de *Escherichia coli* a las células de las plantas superiores cultivadas, pero todavía no se ha logrado producir una planta madura que contenga genes bacterianos. Las dificultades de creación de una planta de maíz capaz de fijar nitrógeno parecen, por consiguiente, muy evidentes.

Aun cuando los genes *nif* pudieran incorporarse al interior de células de plantas como el maíz, no habríamos llegado probablemente a crear un cultivo autofertilizador. Un problema que quedaría por resolver, por ejemplo, sería la protección de la nitrogenasa contra el oxígeno. Queda claro, entonces, que la creación de una planta superior capaz de una fijación eficiente del nitrógeno requiere una amplia modificación de la estructura y del metabolismo vegetal. La tecnología para conseguir este objetivo está aún muy lejana.

Hasta este siglo, los depósitos de nitrato sódico, principalmente los depósitos de nitrato de Chile, habían sido la fuente principal de nitrógeno fijado para la agricultura e, incidentalmente, para las municiones. En 1893, Sir William Crookes advirtió a la British Association for the Advancement of Science que los depósitos chilenos estaban en vías de agotamiento. Fue el conocimiento de esta escasez lo que proporcionó el incentivo necesario para el desarrollo de la fabricación industrial de amoníaco. En la actualidad, parece que el petróleo y el gas natural requeridos para la producción de abonos está también agotándose y urge, pues, encontrar otra fuente para la obtención de nitrógeno agrícola. Los procesos biológicos, que son en realidad los contribuyentes mayoritarios al ciclo del nitrógeno en la naturaleza, se configuran como los candidatos más firmes.

La acústica del canto

La voz es un instrumento formado por una fuente de energía (los pulmones), un oscilador (los ligamentos vocales) y un resonador (la laringe, la faringe y la boca). Los cantantes acomodan el resonador de una forma especial

Johan Sundberg

Es evidente que hay algo poco común en la voz de un cantante de ópera de primera fila. Aparte de la música, la calidad intrínseca de tal voz puede impresionar vivamente. Además, un cantante que ha recibido una buena formación emite sonidos que se pueden oír con nitidez en un teatro de ópera, incluso por encima de un elevado nivel sonoro de la orquesta, proeza que realiza semana tras semana y año tras año. Si un cantante de segundo orden o un cantante sin formación intentara hacerse oír por encima del nivel sonoro de una orquesta, el resultado sería un grito, y la voz del cantante acabaría muy pronto. ¿Sólo la formación crea esa diferencia? ¿Es distinto el instrumento que emite la voz de un buen cantante?

Empecemos por la descripción del instrumento. El órgano de la voz abarca los pulmones, la laringe, la faringe, la nariz y la boca. La principal función vocal de los pulmones estriba en producir una sobrepresión de aire, generando así un chorro de aire. El aire pasa por la glotis, que es un espacio de la base de la laringe, comprendido entre los dos ligamentos vocales (denominados, frecuentemente, cuerdas vocales, aunque en realidad se trata de repliegues elásticos de la mucosa que recubre la laringe). El extremo delantero de cada ligamento vocal se halla sujeto al cartílago tiroides o nuez de Adán. El extremo opuesto se halla sujeto a uno de los dos pequeños cartílagos aritenoides; éstos son móviles y se desplazan hasta conseguir la separación de los ligamentos (en la respiración), el acercamiento y la extensión de los mismos. Además de generar sonido, los ligamentos vocales tienen otra misión, a saber, proteger a los pulmones de la penetración de pequeños corpúsculos arrastrados en el chorro de aire inspirado. Situados sonre los ligamentos vocales, se encuentran los dos ligamentos vocales "falsos", que entran en funcionamiento cuando se retiene la respiración con una sobrepresión de aire en los pulmones. Los ligamentos vocales se localizan en el fondo de la laringe (de forma tubular acoplada a la faringe) cavidad más amplia que une la boca con el esófago. El techo de la faringe está formado por el velo del paladar, o paladar blando, que, a su vez, franquea la entrada a la cavidad nasal. Cuando el velo está en la posición alzada (es decir, cuando se pronuncian las vocales, pero no las nasales) se cierra el paso a la nariz y el aire sale por la boca.

La laringe, la faringe y la boca juntas constituyen el conducto vocal, que es una cámara de resonancia similar al tubo de una trompa o al cuerpo de un violín. La forma de este conducto queda determinada por las posiciones de los articuladores: los labios, la mandíbula, la lengua y la laringe. Los movimientos de los labios, de la mandíbula y de la lengua contraen o dilatan el conducto vocal en ciertos puntos; así, al sacar los labios o al bajar la laringe, crece la longitud del conducto.

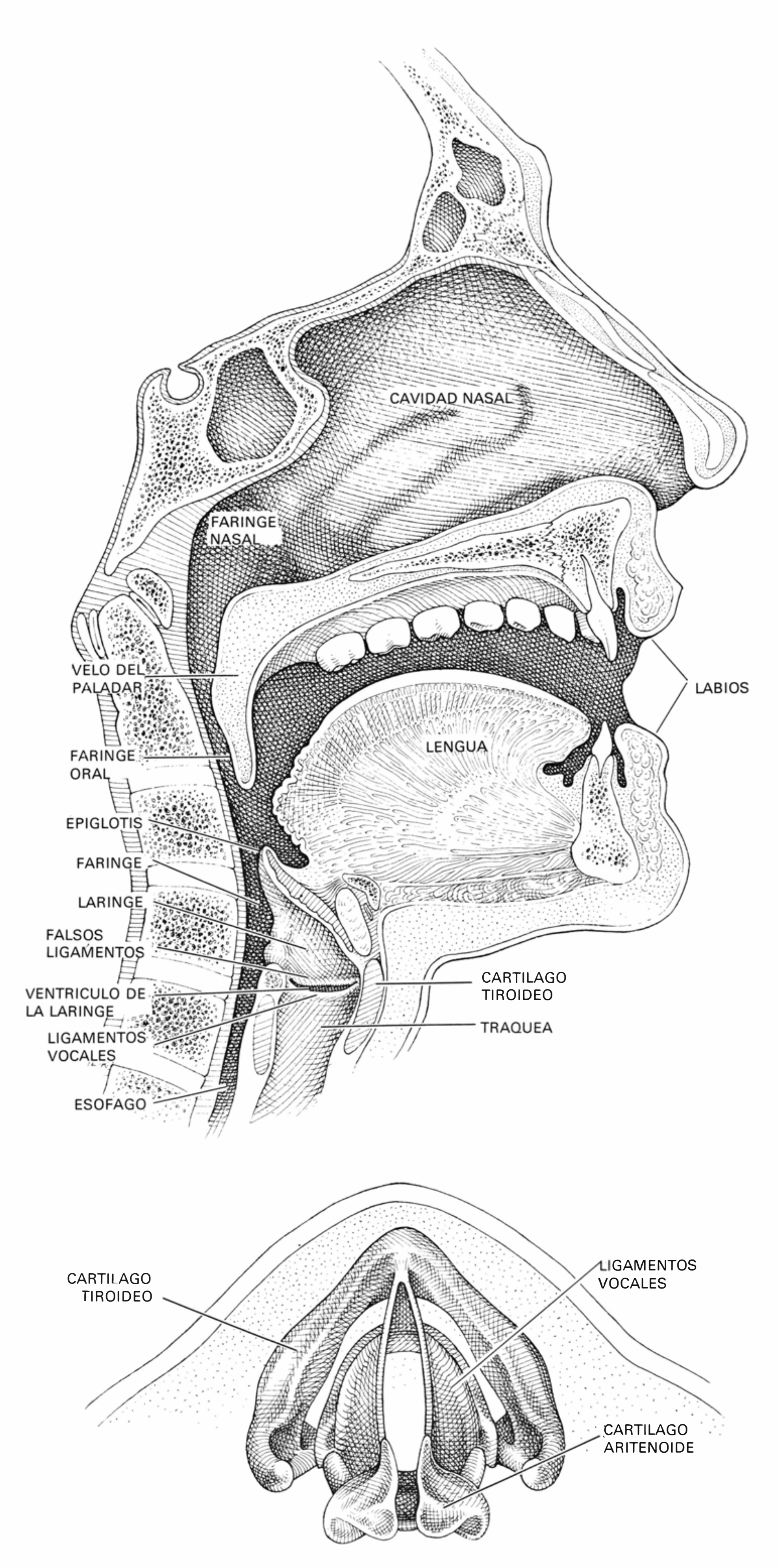
Consideremos ahora el órgano de la voz como un generador de sonidos vocales. Desde el punto de vista de su misión, el órgano tiene tres elementos fundamentales: una fuente de potencia (los pulmones), un oscilador (los ligamentos vocales) y un resonador (el conducto vocal). Al estar la glotis cerrada y un chorro de aire saliendo de los pulmones, la sobrepresión que se ejerce por debajo de la glotis fuerza a que se separen los ligamentos vocales; el aire que pasa por entre los ligamentos genera una fuerza de Bernoulli que, unida a las propiedades mecánicas de los ligamentos, cierra casi inmediatamente la glotis. Se incrementa la diferencia de presión obligando de nuevo a que los ligamentos vocales se separen. El ciclo de apertura y cierre en el que los ligamentos vocales actúan como con los labios vibrantes de un intérprete que toque un instrumento de metal, genera un tren de pulsos de aire que pasan al conducto vocal. La frecuencia de la vibración está determinada por la presión del aire en los pulmones y por las propiedades mecánicas de los ligamentos vocales; éstas se regulan mediante los múltiples músculos de la laringe. Por lo general, cuanto mayor es la presión del pulmón y cuanto más delgados sean y más tensos estén los ligamentos vocales, mayor será la frecuencia a la que vibran los ligamentos y emitan pulsos de aire. El tren de pulsos produce una presión de aire con una oscilación muy rápida en el conducto vocal; en otras palabras, produce un sonido. Su altura depende de la frecuencia vibratoria. La mayoría de los cantantes necesitan desarrollar un control completo a lo largo de una escala de dos octavas o más, mientras que en el habla se requiere menos de una octava.

El sonido generado por el chorro de aire entrecortado por la vibración de los ligamentos vocales se denomina fuente vocal. Se trata de la materia prima del habla o del canto. Es un sonido complejo formado por una frecuencia fundamental (fijada por la frecuencia de vibración de los ligamentos vocales) y un gran número de armónicos o sobretonos. La amplitud de los armónicos decrece uniformemente con la frecuencia, en una proporción de unos 12 decibelios por octava. El "espectro de la fuente" o dia-

grama de la amplitud con respecto a la frecuencia, para un cantante, no difiere mucho del espectro que se registra para otro no cantante, aunque presenta una pendiente más pronunciada cuando se habla bajo que cuando se canta bajo.

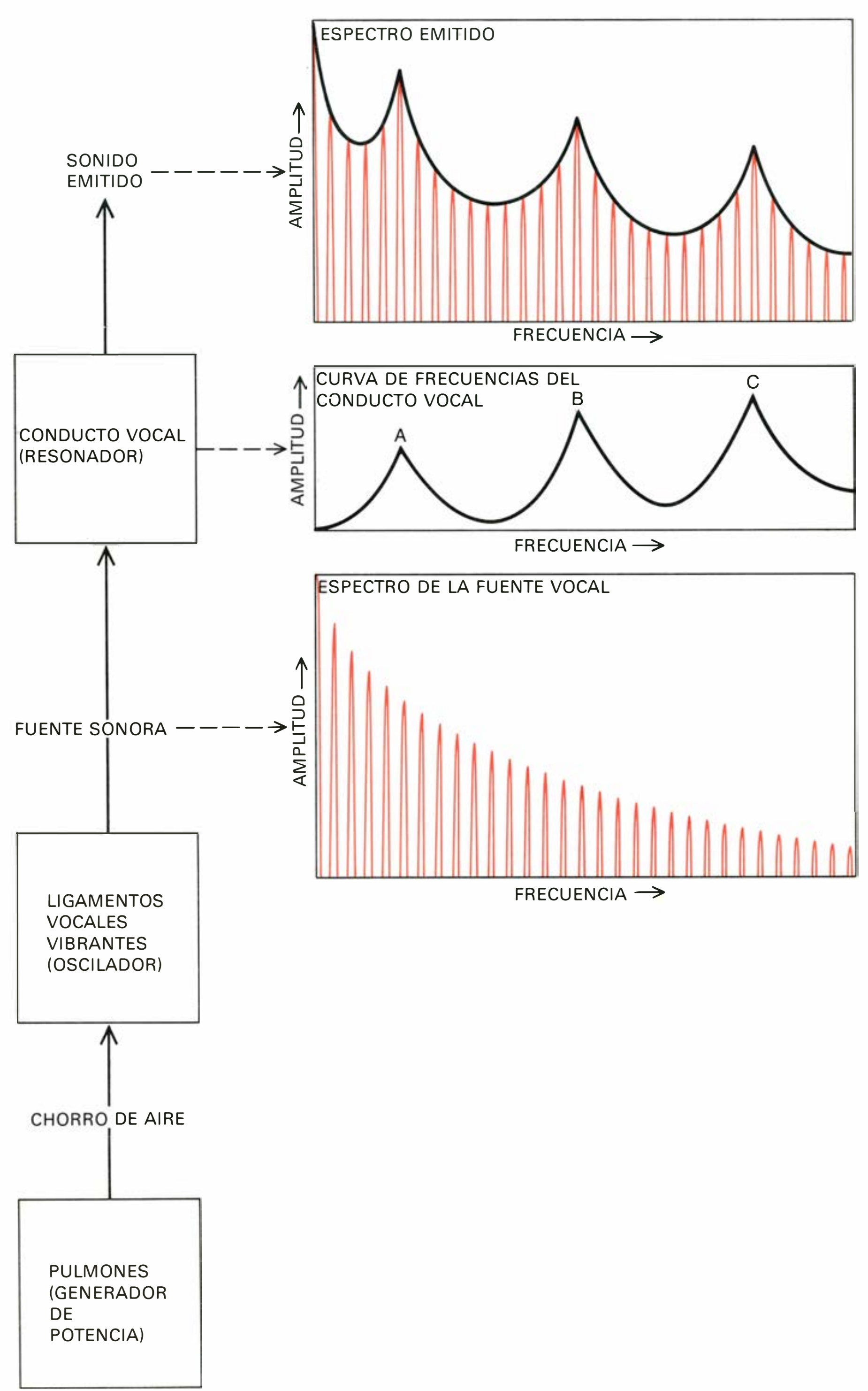
El conducto vocal es un resonador; la transmisión de un sonido a través de un resonador acústico es función de la frecuencia. Los sonidos correspondientes a la frecuencia de resonancia propia de cada resonador son menos atenuados que otros sonidos, y, por lo tanto, son emitidos con una mayor amplitud relativa o con un mayor volumen relativo que otros sonidos; sépase, pues, que cuanto mayor sea la diferencia de frecuencia entre un sonido y una resonancia, más débil será la emisión del sonido. El conducto vocal tiene cuatro o cinco resonancias importantes denominadas formantes. Todos los armónicos de la fuente vocal pasan por el conducto vocal con más o menos éxito, según su frecuencia; cuanto más cerca esté un armónico de la frecuencia de un formante, tanto más aumentará su amplitud en los labios. La presencia de los formantes interrumpe la envolvente, de pendiente uniforme, del espectro de la fuente sonora, creando picos en las frecuencias del formante. Esta perturbación de la envolvente de la fuente sonora es la que produce sonidos inteligibles al hablar: ciertas frecuencias de los formantes se manifiestan en el espectro emitido como picos en la envolvente, picos que son característicos de ciertos sonidos.

Las frecuencias de los formantes dependen de la forma del conducto. Suponiendo que el conducto vocal fuera un cilindro perfecto, cerrado en la glotis y abierto en los labios, de 17,5 centímetros de longitud, lo que resulta bastante verosímil en el caso de un varón adulto, entonces los primeros cuatro formantes tendrían frecuencias cercanas a 500, 1500, 2500 y 3500 hertzios (ciclos por segundo). Si el conducto vocal fuera más largo, o



EL ORGANO DE LA VOZ está formado por los pulmones y la laringe, la faringe, la boca y la nariz *(en sección longitudinal, arriba).* **La laringe es un tubo corto en cuya base se hallan unos ligamentos gemelos de membrana mucosa, los ligamentos vocales. La laringe está abierta hacia la faringe, la apertura está protegida, durante la ingestión, por la epiglotis. La laringe, la faringe y la boca (y, en los sonidos nasales, también la nariz) constituyen el conducto vocal. Es un resonador que determina los sonidos de las vocales, cuya forma se modifica mediante las variaciones de posición de los articuladores, a saber: los labios, la mandíbula, la punta y el cuerpo de la lengua y la laringe. Los ligamentos vocales** *(en sección transversal, abajo)* **se abren para respirar y se cierran para emitir sonido con los cartílagos aritenoides que giran.**

más corto, estas frecuencias base resultarían algo inferiores, o superiores. Cada formante está asociado con una onda estacionaria, es decir, con un modelo estático de oscilaciones de presión cuya amplitud es máxima en el extremo de la glotis y próxima a un mínimo en los labios *(véase la ilustración de la página 59).* El formante más grave corresponde a un cuarto de longitud de onda, lo que equivale a decir que un cuarto de longitud de onda cabe en el conducto vocal. Del mismo modo, el segundo, el tercer y el cuarto formante corresponden, respectivamente, a tres cuartos de longitud de onda, uno y un cuarto de longitud de onda y uno y tres cuartos de longitud de onda.

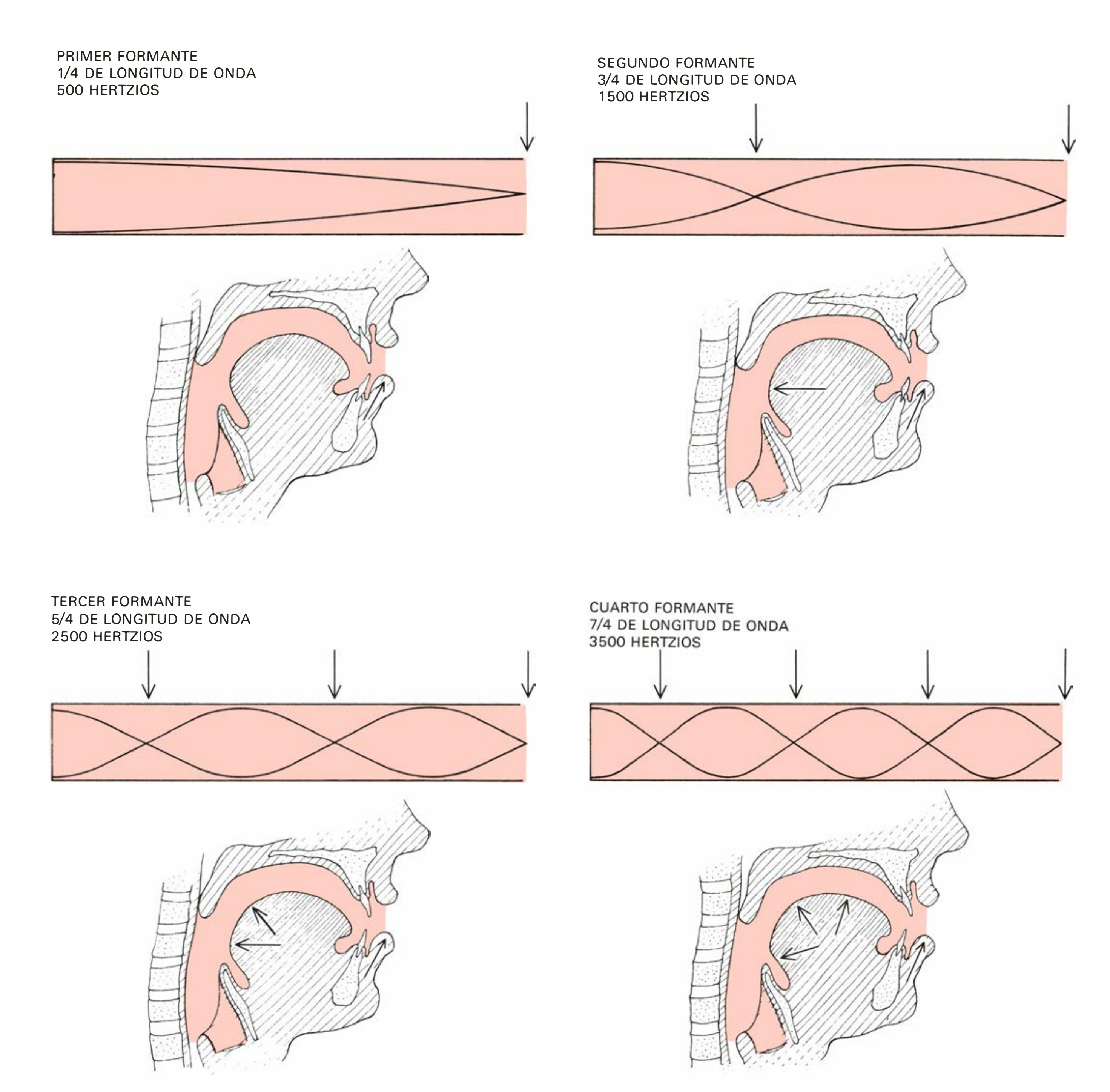


EL ORGANO DE LA VOZ consta de un generador de potencia, un oscilador y un resonador. El chorro de aire procedente de los pulmones se interrumpe periódicamente por la vibración de los ligamentos vocales. El sonido resultante, la fuente de voz, tiene un espectro *(derecha)* que contiene gran número de armónicos cuya amplitud decrece uniformemente con la frecuencia. La columna de aire que discurre por el conducto vocal tiene unos modos de vibración, o resonancias, característicos, llamados formantes *(A,B,C).* Como la fuente vocal pasa a través del conducto vocal, cada armónico se atenúa en proporción a su distancia del formante más cercano a su frecuencia. Por tanto, las frecuencias de los formantes aparecen como picos en el sonido emitido por los labios; los picos representan unos sonidos particulares de las vocales.

Cualquier variación en la sección transversal del conducto vocal modifica las distintas frecuencias de los formantes, toda vez que la dirección del desplazamiento es función del lugar en donde se produce el cambio de sección a lo largo de la onda estacionaria. Por ejemplo, una contracción del conducto vocal en un punto en donde la onda estacionaria de un formante presenta oscilaciones de presión de amplitud mínima determina, generalmente, la reducción de la frecuencia del formante; por el contrario, una dilatación del conducto en estos mismos puntos incrementará la frecuencia.

El conducto vocal se contrae y se dilata de muchas formas, un tanto complejas, y su contracción en un punto incide en la frecuencia de todos los formantes de diferentes maneras. Hay, sin embargo, tres elementos muy importantes para cambiar la forma del conducto, de suerte que la frecuencia de un formante particular pueda ser desplazada en una cierta dirección. Estos elementos son la mandíbula, el cuerpo y la punta de la lengua. La apertura de la mandíbula puede reducir el conducto en la zona cercana a la glotis y ampliarlo en la región de los labios; tal apertura resulta decisiva para la frecuencia del primer formante, que aumenta a medida que se va abriendo la mandíbula. La frecuencia del segundo formante es muy sensible a la forma del cuerpo de la lengua; la frecuencia del tercer formante es sensible a la posición de la punta de la lengua. Si movemos los distintos articuladores de manera diferente, se modifica la frecuencia de los dos formantes más graves a lo largo de una escala bastante amplia, que, en el caso de varones adultos, se halla entre 250 y 700 hertzios para el primer formante y, entre 700 y 2500 hertzios, para el segundo formante. En el habla y en el canto se mueven los articuladores; en realidad masticamos las ondas estacionarias de nuestros formantes para modificar sus frecuencias. Cada configuración de articuladores corresponde a un juego de formantes, que, a su vez, están asociados con un sonido de vocal particular. Especificando más, las frecuencias de los formantes resaltan los armónicos de la fuente de voz de ciertas frecuencias, que, por tanto, se manifiestan como los picos que caracterizan la envolvente espectral del sonido de cada vocal.

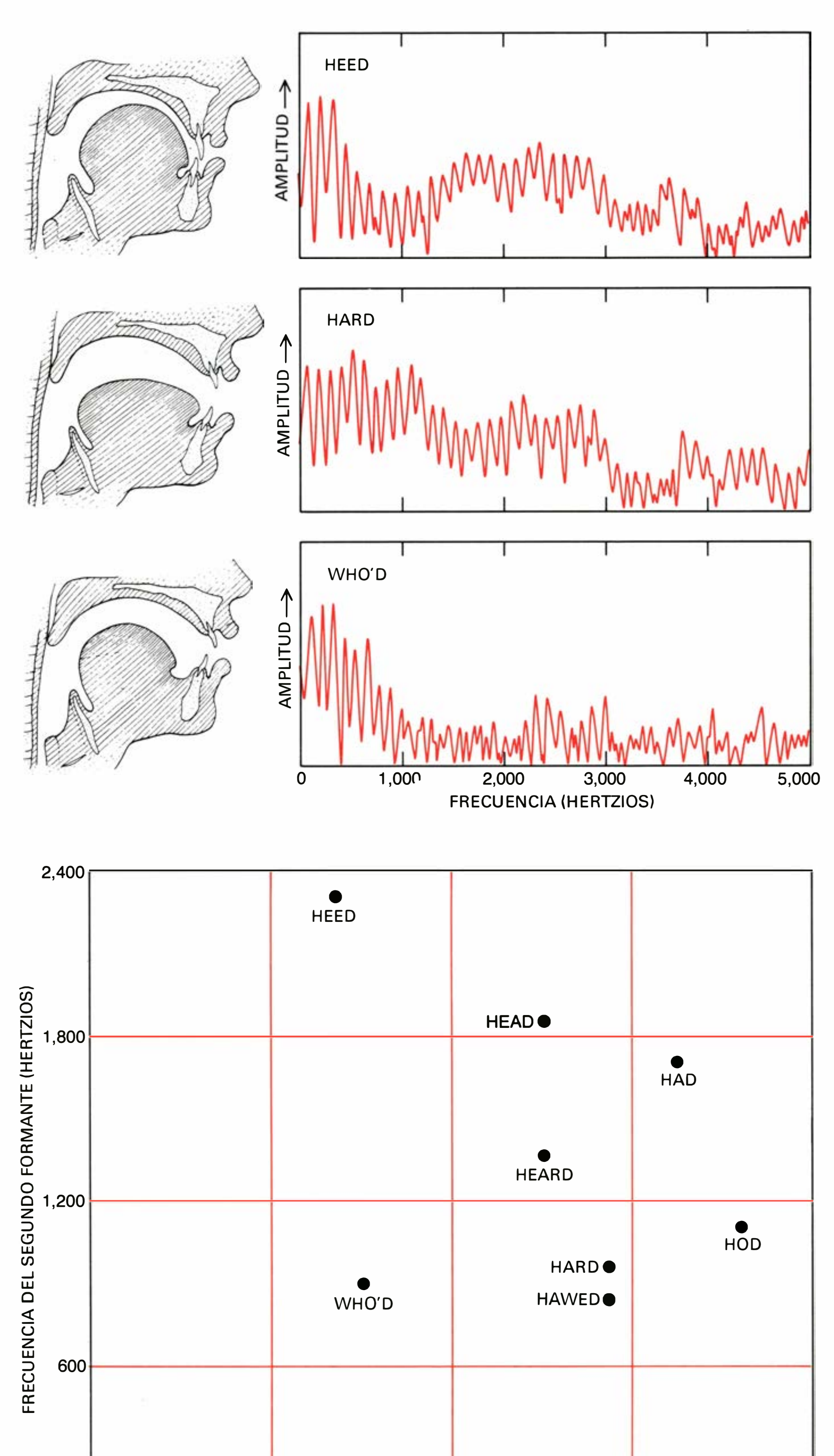
Todos los elementos y funciones del órgano de la voz que se han descrito son comunes a cantantes y a no cantantes.



LOS FORMANTES corresponden a ondas estacionarias, o modelos estáticos de oscilaciones de la presión del aire en el conducto vocal. Se representan los cuatro primeros formantes como ondas estacionarias en tubos cilíndricos, que es el equivalente esquemático del conducto vocal *(zonas coloreadas en los dibujos).* **Las ondas sinusoidales representan la amplitud de la presión diferencial, que siempre es máxima en la zona de la glotis y mínima en los labios. Para el formante más grave, un cuarto de la longitud de onda se halla dentro del conducto vocal; si este conducto tiene una longitud de 17,5 cm, la frecuencia del formante se sitúa en torno a los 500 hertzios (ciclos por segundo). El segundo, el tercer y cuarto formante se sitúan a 3/4, 5/4 y 7/4 de longitud de onda, y sus frecuencias varían correlativamente. Si se incrementa o se disminuye el área del conducto vocal en los puntos donde la amplitud de la presión del formante es mínima** *(flechas),* **mengua o aumenta, respectivamente, la frecuencia del formante; el mismo cambio de sección tiene un efecto contrario si se produce en el punto en donde la presión es máxima.**

¿Hacen uso los primeros de otras facultades, o manipulan el instrumento de la voz de otra forma? Comparemos el habla normal de un varón adulto y el cante de ópera. Si se presta atención a la voz de un cantante, se revela un sinnúmero de desviaciones pequeñas, aunque muy características, en la calidad de las vocales con respecto al habla normal. Por ejemplo, el sonido inglés *ee* en la palabra "beat" se desplaza hacia el sonido alemán *ü* de la palabra "für", la *e* corta de "head" pasa hacia el sonido de la vocal de "heard". La impresión general es que la calidad de la voz es más "oscura" al cantar, algo similar a lo que ocurre cuando una persona bosteza y habla al mismo tiempo: los profesores de canto suelen aplicarle a ese efecto el calificativo de "cubierto".

Se ha visto que estas variaciones en la calidad de la vocal se hallan asociadas a ciertas peculiaridades de la articulación. Al cantar "cubierto", se baja la laringe; las fotografías tomadas con rayos X revelan que el cambio de posición de la laringe viene acompañado por una expansión de la parte inferior de la faringe y del ventrículo de la laringe, que es el espacio entre los ligamentos vocales ver-

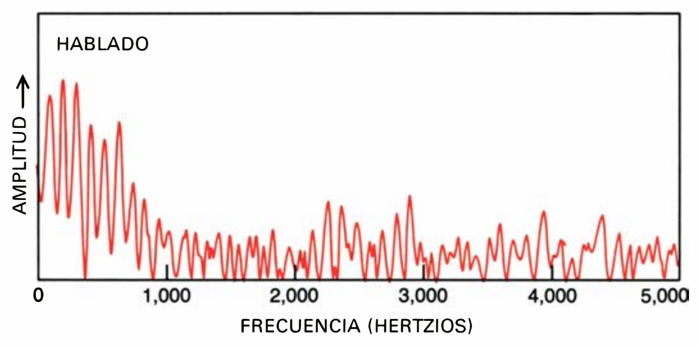


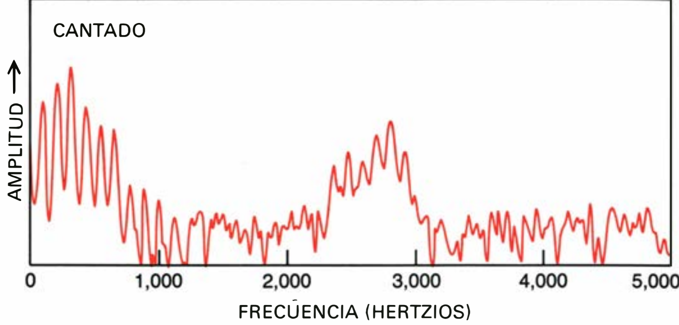
EL MOVIMIENTO DE LOS ARTICULADORES cambia la sección del conducto vocal, desplazando las frecuencias de los formantes. Se muestran tres configuraciones de articulaciones *(arriba)*, junto con el espectro del sonido de la vocal producidos por cada una; los picos de la envolvente del espectro reflejan las frecuencias de los formantes. El diagrama *(abajo)* de las frecuencias del primer y del segundo formante en algunos sonidos de vocal, en inglés, tal como los pronuncia un adulto. Tratándose de una mujer o de un niño, el modelo de envolvente sería aproximadamente el mismo, si bien la frecuencia de los picos se desplazaría un poco hacia arriba.

daderos y los falsos. Conviene observar que los profesores de canto tienden a estar de acuerdo en que la faringe debiera abrirse al cantar, y algunos de ellos hablan incluso de simular la sensación del bostezo. En otras palabras, una posición baja de la laringe y una faringe expandida se consideran deseables para el canto.

Lo que reconocemos como una calidad vocal oscura en el canto se refleja claramente en el espectro del sonido de una vocal cantada. Una comparación entre los espectros de la vocal de la palabra inglesa "who'd" hablada y cantada muestra que las frecuencias de los dos formantes graves son algo más bajas en la versión cantada; y, también, que la energía espectral, o amplitud, es considerablemente superior, situándose entre 2500 y 3000 hertzios *(véase la ilustración superior de la página 61)*. Este pico de la envolvente espectral es típico de todos los sonidos vocales cantados por cantantes profesionales varones. Su presencia, independientemente de la altura, de la vocal en particular y del nivel dinámico, ha pasado a ser un criterio de calidad; el pico adicional se ha designado con el nombre de "formante de canto".

¿Cuál es el origen del pico denominado formante de canto? Normalmente, los picos de la envolvente del espectro de una vocal aparecen, como quedó explicado, por la presencia de ciertos formantes. La inclusión de un formante adicional entre los formantes normales tercero y cuarto produce el tipo de pico que se observa en el espectro de la vocal cantada *(véase la ilustración inferior de la página 61)*. Además, cuando desciende la laringe, la acústica del conducto vocal es compatible con la generación de este formante adicional. Se puede calcular que si la superficie de la sección de la laringe que penetra hacia la faringe es inferior a un sexto de la superficie de la sección transversal de la faringe, entonces la laringe no está acústicamente acoplada con el resto del conducto vocal; tiene una frecuencia de resonancia propia, independiente con mucho del resto del conducto. Se consigue la proporción de un sexto cuando se baja la laringe, porque el mero hecho de bajarla no tiende a dilatar la parte distal de la faringe. A partir de radiografías de la laringe bajada llegué a calcular que esta frecuencia de resonancia de la laringe bajada debiera situarse entre 2500 y 3000 hertzios, es decir, entre las frecuencias de los formantes normales tercero y cuarto, justo en el punto donde aparece el pico del formante de canto. En otras palabras, el descenso de la laringe parece explicar el pico del formante de canto.



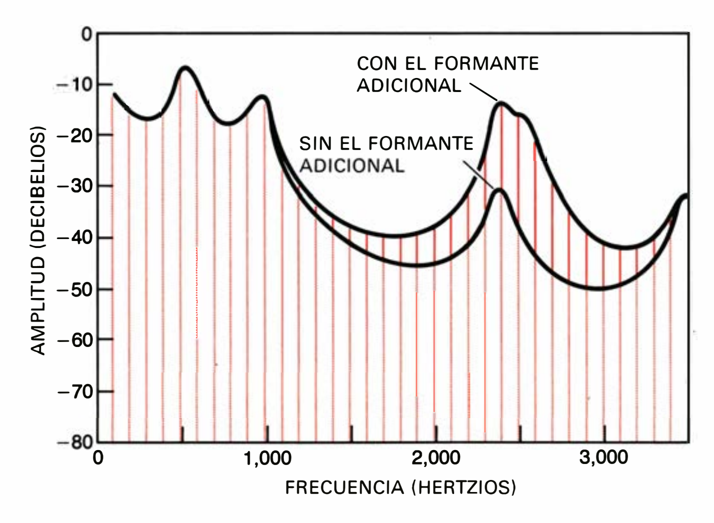


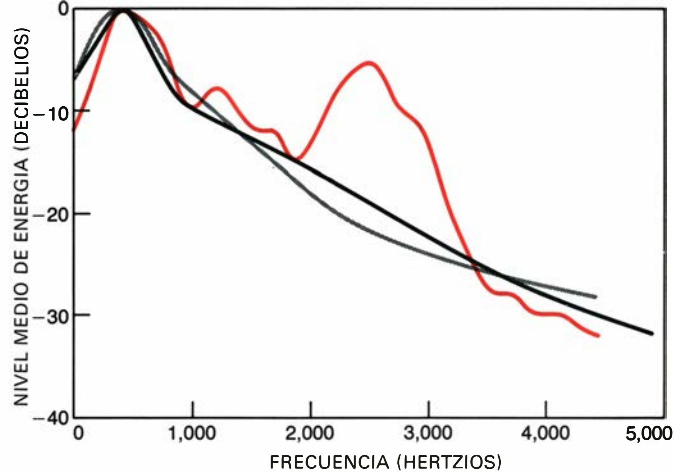
LAS VOCALES SUENAN DE FORMA DIFERENTE en la acción de hablar y de cantar, diferencia que queda patente en los espectros registrados. Aquí se compara el espectro de la vocal en "who'd" hablada *(izquierda)* **con el espectro de la misma vocal cantada** *(derecha)* **por un cantante de ópera masculino. En el espectro cantado, difiere significativamente el pico de la energía espectral, situada entre 2500 y 3000 hertzios.**

También sirve para algo más. Desde el punto de vista de la acústica, la expansión de la zona más baja de la faringe equivale a un incremento en la longitud del conducto vocal, y, al bajar la laringe, todavía aumenta más dicha longitud. De ello resulta que se desplazan hacia los valores más pequeños todas las frecuencias de los formantes, excepto el formante adicional que depende de la posición de la laringe. Este descenso de la frecuencia se hace particularmente notable en formantes que dependen, sobre todo, de la longitud de la faringe. Dos ejemplos de tales formantes son el segundo formante de las vocales en "beat" y "head"; un bajón de frecuencia de tales formantes desplaza sus vocales hacia las vocales de "für" y "heard". El descenso de la laringe no sólo explica el pico del formante de canto sino también ciertas diferencias notables en la calidad de las vocales al hablar y al cantar.

Sin embargo, no basta explicar el origen articulado y acústico del formante de canto. ¿Por qué es deseable para los cantantes bajar la laringe, y producir así el formante de canto y oscurecer la calidad de las vocales? Se ha encontrado una respuesta plausible. Según ella, está relacionado con el ambiente acústico en el que tienen que actuar los cantantes de ópera y concierto, en concurso con una orquesta. Un análisis de la distribución media de la energía en los sonidos de una orquesta de ópera o concierto muestra que el nivel más alto de sonido se halla en la región de los 450 hertzios; por encima de este valor, la amplitud decrece rápidamente con la frecuencia. Ahora bien, en el habla normal se desarrolla una energía media máxima que se sitúa aproximadamente alrededor de la misma frecuencia, y se debilita a frecuencias superiores. Es decir, si un cantante emitiera sonidos con la distribución de energía propia del habla normal tendría dificultades: los sonidos más potentes de la orquesta ahogarían los sonidos emitidos por él. La distribución media del sonido de un cantante profesional difiere de la distribución del habla normal –y, por tanto, de la distribución de una orquesta–, lo cual se debe, principalmente, al efecto del formante de canto. Hemos demostrado que la voz de un cantante se oye con mayor facilidad con respecto a un ruido grabado dotado de la misma distribución media de energía que el sonido producido por una orquesta, cuando la voz tiene un formante de canto. Y no sólo se oye invariablemente el formante porque su frecuencia se halla en una región en la cual el sonido de la orquesta es más bien débil, sino también porque puede ayudar al oyente a "imaginar" que escucha otros fragmentos del espectro del cantante que, en realidad, quedan ahogados por la orquesta.

El formante de canto tiene una frecuencia óptima, suficientemente elevada como para estar en la región donde disminuye la energía del sonido orquestal, pero no tan alta como para situarse en la región donde el cantante pueda perder



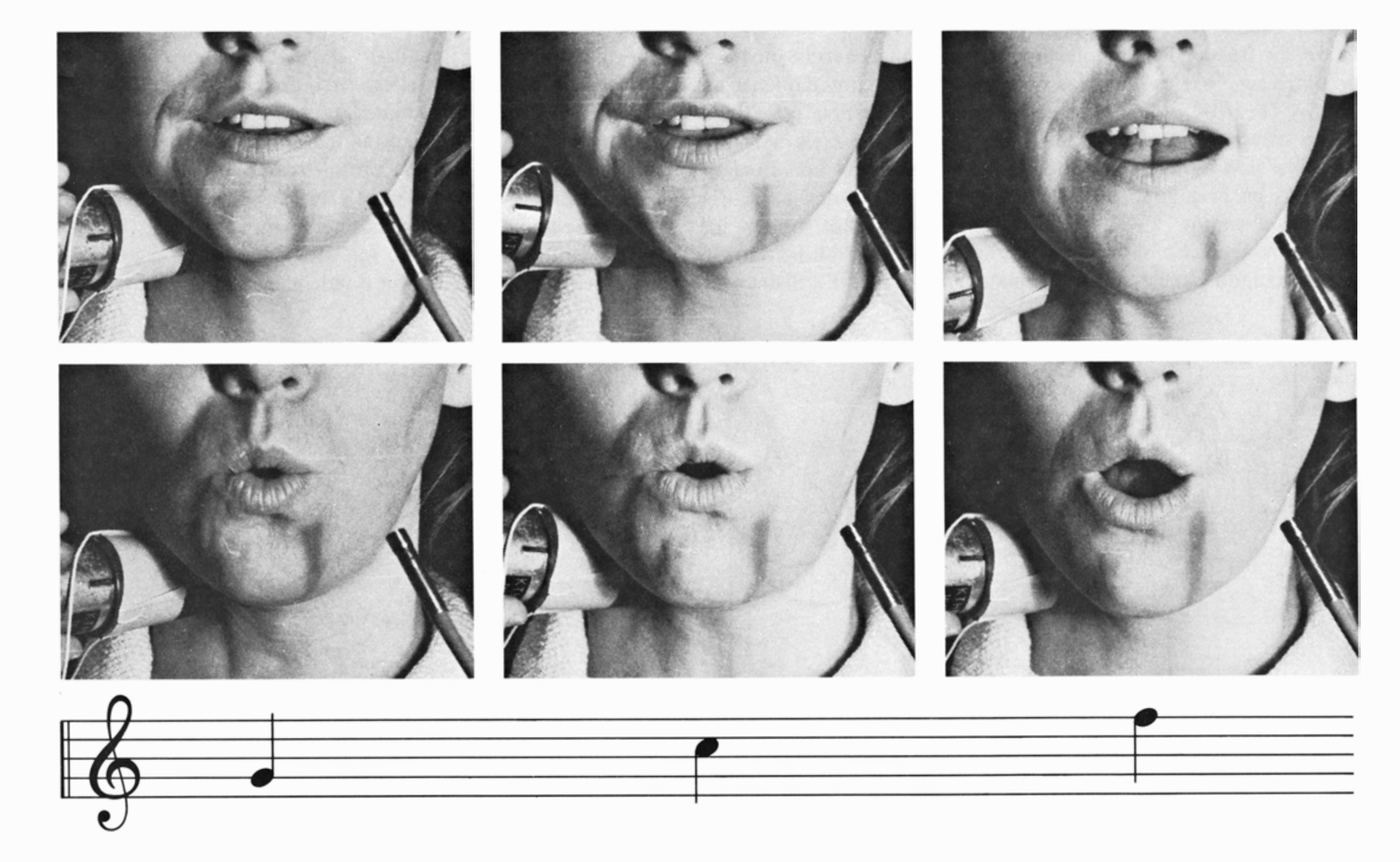


EL ORIGEN DEL FORMANTE *(izquierda)* **y su utilidad en el canto** *(derecha)* **se deducen de estos gráficos. Se ha introducido un formante adicional entre los formantes tercero y cuarto normales en un experimento con un resonador electrónico que se comporta como un conducto vocal** *(izquierda).* **El nuevo formante incrementó la amplitud de los armónicos a su alrededor en más de 20 decibelios; de manera similar un formante adicional (obtenido bajando la laringe) produce un pico de alta frecuencia en el espectro de una vocal cantada. Las tres curvas** *(derecha)* **muestran la distribución media de energía en un sonido procedente de una orquesta** *(negro)*, **en otro de habla normal** *(gris)* **y en un tercero del fallecido tenor Jussi Björling cantando con orquesta** *(color).* **La distribución para voz hablada y orquesta es muy parecida en todas las frecuencias; la voz del cantante tiene un pico en la curva de color situado entre los 2000 y los 3000 hertzios. En esta región de frecuencias, la voz de un cantante tiene suficiente intensidad, de suerte que, si la comparamos con el sonido de una orquesta, se la podrá distinguir con nitidez.**

el control. Al generarse por puro efecto de resonancia, no exige esfuerzo vocal alguno; el cantante logra audibilidad sin tener que generar una presión de aire suplementaria. Sin embargo, el cantante paga un precio: los sonidos oscurecidos de las vocales se desvían considerablemente de lo que se suele distinguir en el habla. En algunos estilos de canto, el precio resulta demasiado caro: las ideas y los sentimientos expresados en el repertorio de un cantante pop, por ejemplo, no resistirían las desviaciones de lo natural que se exigen en la generación del formante de canto. Los cantantes pop, en realidad, no oscurecen sus vocales, sino que dependen de la amplificación electrónica para que pueda oírseles.

Las viñetas humorísticas suelen representar a las cantantes de ópera como señoras obesas en actitud de abrir mucho la boca. En un estudio sobre cantantes femeninos analicé la forma de actuar con la mandíbula: operaban con ella de distinta manera al hablar que al cantar. Al hablar, el tamaño de la abertura de la mandíbula variaba con la vocal en particular, pero en el canto femenino también era función de la nota que se cantaba; así, cuanto más aguda era la emisión de voz de una soprano tanto más abría la mandíbula. Ello me indujo a concluir que una soprano debía modificar la frecuencia del primer formante de acuerdo con la nota emitida. Un análisis de las frecuencias del formante confirmó que la articulación se modificaba de tal manera que se incrementaba la frecuencia del primer formante y se acercaba a la frecuencia del fundamental de la nota que se emite. Observé dicho acoplamiento de frecuencias cuando la frecuencia del fundamental era superior a la frecuencia del primer formante de la vocal al hablar normalmente.

El motivo se esclarece cuando se considera que la frecuencia de la nota de los sonidos producidos por una soprano suele ser muy superior a la frecuencia del primer formante en la mayoría de las vocales. Si una soprano canta la vocal inglesa *ee* con la nota de su do central y la articulación correspondiente al habla normal, su primer formante se hallaría en las cercanías de los 270 hertzios y la frecuencia de la nota (la frecuencia de su armónico más grave en el espectro) casi se hallaría una octava por encima, a 523 hertzios. Como un sonido se atenúa en proporción a la distancia de su frecuencia con respecto a una frecuencia de formante, el fundamental sufriría una gran pérdida de amplitud. El fundamental es el armónico de mayor potencia en el espectro de la fuente vocal; cuanto más aguda sea una nota tanto más importante será el fundamental para su volumen; de esta suerte, el *ee* emitido por la cantante sería relativamente débil. Supongamos que el siguiente sonido que emite sea el sonido inglés *ah,* de "father", cantado con la nota del fa agudo. El fundamental a 698 hertzios estaría muy cerca de la frecuencia del primer formante, situado a unos 700 hertzios, y, entonces, la nota tendría volumen. El volumen de las notas producidas por la cantante variarían de acuerdo a un determinante más bien poco musical: la distancia de frecuencias entre el primer formante y el fundamental. Con el fin de modular el volumen de acuerdo con el contexto musical, la cantante tendría que modificar constantemente su esfuerzo vocal. Esto



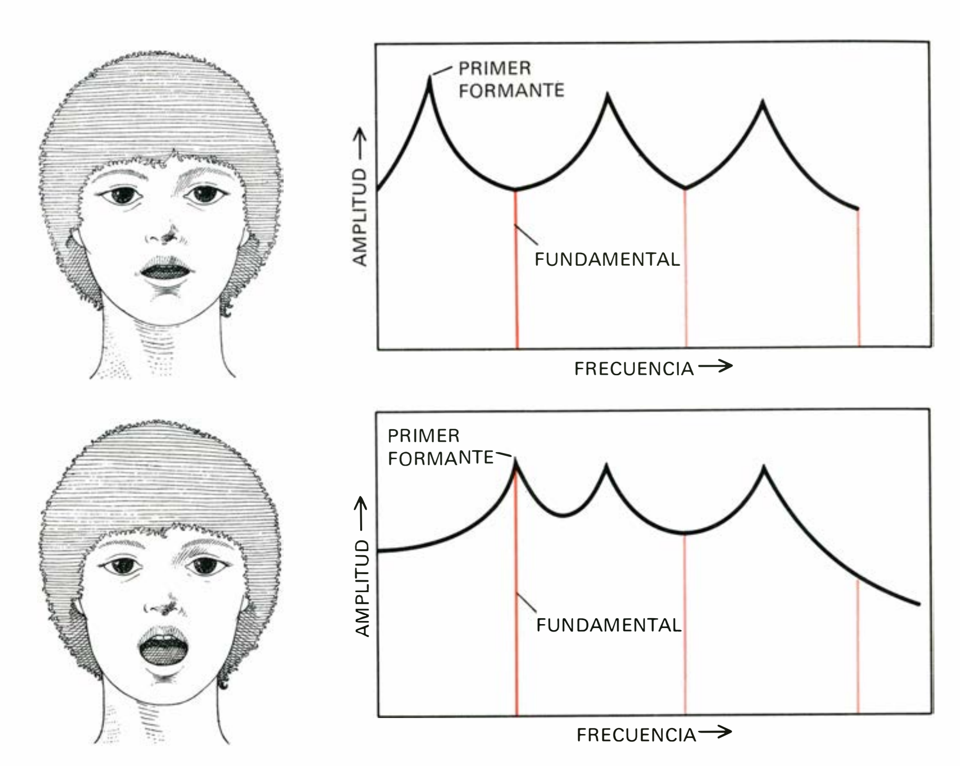
LAS SOPRANOS y otras cantantes de voces agudas tienden a ir abriendo cada vez más la boca conforme las notas van siendo más agudas. La tendencia se observa en estas imágenes de una soprano cantando los sonidos de las vocales de "heed" *(arriba)* y de "who'd" *(centro)* con alturas cada vez más agudas, indicadas en la notación musical *(abajo)*. La cantante sostiene un vibrador contra su cuello y hay instalado un pequeño micrófono cerca de sus labios. Empieza cantando cada vocal a una altura específica y, a continuación, con el vibrador en marcha, deja de cantar, aunque mantiene las posiciones de los articuladores. El vibrador produce entonces un sonido grave continuo condicionado por el conducto vocal de la cantante, como si fuera su propia fuente vocal, pero más apropiada para análisis que en el caso de una nota aguda de la voz.

cansaría sus ligamentos vocales. (Los experimentos realizados con sonidos sintetizados de vocales ponen de manifiesto que también produciría notas más propias de un ratón sometido a un gran esfuerzo que a una cantante de ópera...)

La solución a que recurre la soprano consiste en desplazar hacia arriba la frecuencia del primer formante, de modo que coincida con la frecuencia del fundamental, permitiendo siempre que el formante resalte la amplitud del fundamental. De ello resulta que la variación de intensidad es mínima de una nota a otra y de una vocal a otra vocal. Además, modificando la apertura de la mandíbula se obtiene una intensidad máxima con el mínimo esfuerzo vocal. Estrategia que no sólo emplean las sopranos sino también otros cantantes cuya escala vocal comprende frecuencias superiores a las del primer formante en el habla normal: contraltos, tenores y, a veces, incluso barítonos.

No le resulta nada cómodo a un alumno de canto aprender esta forma especial de controlar la apertura de la mandíbula, en particular si los músculos maxilares están continuamente bajo tensión. Esto explica por qué muchos profesores de canto intentan que sus alumnos relajen la mandíbula. Otra advertencia que se les suele hacer es: "Oír internamente la nota siguiente antes de empezar a cantarla". Consejo que puede resultar muy necesario porque el correcto movimiento de la apertura de la mandíbula requiere una planificación previa de la articulación para ciertas vocales y para la nota en la que se tiene que cantar. Con todo, la apertura de la mandíbula no es la única manera de desplazar hacia arriba la frecuencia del primer formante. Acortando el conducto vocal, tirando hacia atrás las comisuras de la boca, se obtiene el mismo resultado y éste es el motivo por el cual ciertos profesores recomiendan a sus alumnos que sonrían cuando cantan notas agudas.

Como las frecuencias de los formantes determinan la calidad de la vocal, un desplazamiento de la frecuencia del primer formante realizado de un modo arbitrario, según la nota, puede producir un sonido distorsionado de la vocal, y llegar incluso a producir un sonido ininteligible. No se produce este efecto, debido, principalmente, a que estamos acostumbrados a oír vocales emitidas a diferentes alturas al hablar normalmente hombres, mujeres y niños con conductos vocales de distintas longitudes; si una vocal es aguda la asociamos con frecuencias relativamente altas del formante. La correlación está tan bien establecida en nuestro sistema perceptivo que podemos distinguir fácilmente un cambio de vocal cuando oímos dos sonidos con las mismas frecuencias de formante y a distintas alturas; si una cantante desplaza hacia arriba la frecuencia del primer formante con la nota, parte de este incremento se necesita para mantener la identidad de la vocal. Es cierto que, cuando la nota es muy aguda, disminuye nuestra capacidad de identificación de vocales, pero esto parece ser cierto independientemente de las frecuencias de los formantes. En otras palabras, una soprano no sacrifica mucha inteligibilidad de la vocal emitida como resultado específico de su elección de la frecuencia del primer formante en función de la nota. (Cabe decir que los compositores de música vocal son conscientes del problema de la identificación de vocales en el registro agudo, y suelen evitar la presentación de fragmentos importantes del texto sólo en el registro agudo de una soprano; a menudo, el texto se repite de forma que las palabras puedan ser entendidas en un registro inferior.)



LA NECESIDAD DE ABRIR MUCHO LA MANDIBULA procede del hecho de que una soprano suele cantar notas cuyo fundamental (el armónico más grave) tiene una frecuencia muy superior a la del primer formante normal de la vocal que se canta. Cuando se presenta el caso *(arriba)*, la amplitud del fundamental no es reforzada por el primer formante y el sonido emitido es débil. Abriendo más la mandíbula, se incrementa la frecuencia del primer formante. Cuando ésta se eleva de forma que coincide con el fundamental *(abajo)*, el formante aumenta la amplitud del fundamental.

Queda claro que buena parte de la diferencia entre vocales habladas y cantadas puede explicarse por la necesidad, por parte del cantante, de economizar esfuerzo vocal. La idea general es la misma, se trate de hacerse oír por encima del nivel de la orquesta o de mantener la intensidad en el registro agudo, a saber: aprovechar las características de resonancia del conducto vocal de forma que se amplifique el sonido.

Una confirmación de la importancia de los formantes se obtuvo a través de un estudio reciente sobre la clasificación de las voces masculinas en bajo, barítono y tenor. Sin duda, la escala de frecuencias de un cantante es, en definitiva, el elemento determinante; aun cuando no se haya desarrollado todavía la escala real (que queda establecida principalmente por la forma, el tamaño y la musculatura de los ligamentos vocales), un buen profesor de canto puede hacer la clasificación después de oír la voz de un alumno. ¿Cómo es ello? Thomas F. Cleveland, que visitó nuestro laboratorio en el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, y se encuentra actualmente en la Universidad del Sur de California, analizó vocales cantadas por bajos, barítonos y tenores con respecto a las frecuencias de los formantes y al espectro de la fuente vocal. A continuación, hizo que un jurado de profesores de canto escuchara las muestras de voz y clasificara las voces. Los profesores tendían a clasificar las vocales cuyas frecuencias del formante fueran relativamente

graves, como si hubieran sido cantadas por voces graves, y las vocales cuyas frecuencias del formante fueran agudas, como si hubieran sido cantadas por tenores. Por otra parte, las variaciones en el espectro de la fuente vocal (que variaba muy poco con la altura a la que se cantaba la vocal) no ofrecía ninguna clave para obtener una clasificación congruente. En una segunda prueba, el mismo jurado escuchó una serie de sonidos sintetizados (y por lo tanto muy definidos), y se confirmó la impresión original de Cleveland: cuanto más bajas eran las frecuencias del formante de una determinada vocal, tanto más grave se estimaba el registro vocal del cantante.

Cleveland descubrió que las voces típicas de bajo y tenor difieren en la frecuencia de los formantes, al igual que ocurre entre las voces masculinas y femeninas. La diferencia de frecuencia de los formantes entre hombres y mujeres se debe, principalmente, a la longitud del conducto vocal; la diferencia entre tenor y bajo se puede explicar por el mismo hecho físico. Sin embargo, las frecuencias de los formantes no vienen determinadas solamente por la morfología del conducto vocal, sino también por los hábitos de articulación, que suelen variar muchísimo. Sea como fuere, la morfología del conducto vocal debe imponer limitaciones a la escala de frecuencia de formantes de que dispone un cantante.

Al llegar hasta aquí, el lector que conozca y se interese por la música puede haber quedado defraudado. No he mencionado toda una serie de factores que a menudo se citan como determinantes de excelencia en el canto: la cavidad nasal, las resonancias de la cabeza y el tórax, la respiración, etc. No me he referido a ellos porque no parecen afectar las principales propiedades acústicas de los sonidos vocales emitidos por cantantes de ópera. Al final de nuestra investigación nos inclinamos por la idea de que la calidad puede alcanzarse mediante una fuente vocal normal y mediante las resonancias del conducto vocal.

El modelo que hemos presentado puede que no sea perfecto. Por ejemplo, cabe que la cavidad nasal influya en el canto de vocales que, normalmente, no se nasalizan. Caso de que fuera así, hemos atribuido su efecto a la fuente vocal, compensándose un error con la comisión de otro. Además, sólo hemos tratado sonidos sostenidos de vocales, cuya emisión es importante, pero no es el único fenómeno que se produce al cantar.

Las resonancias que se producen independientemente del conducto vocal, verbigracia, en la cabeza o en el tórax, no pueden contribuir, de un modo notable, a la emisión acústica del cantante si lo comparamos con la atenuación que sufre el sonido a medida que pasa por los tejidos. Ello no significa que tales resonancias no puedan importarle al cantante; puede percibir puntos de referencia de su interpretación no sólo por lo que oye, sino también por las vibraciones percibidas. Con respecto a la respiración es evidente que los ligamentos vocales vibrarían con cualquier técnica que produjera una sobrepresión de aire debajo de la glotis. El control de la respiración y de la laringe son, tal vez, fisiológicamente interdependientes, pues la laringe es el portero de los pulmones. Probablemente, las distintas maneras de respirar están asociadas con diferentes ajustes de la laringe, y cabe pensar en que alguna de estas maneras sean adecuadas para cantar y otras, en cambio, resulten inadecuadas o no prácticas.

Volvamos a la pregunta del principio: ¿qué misterio encierra la voz de una cantante? El órgano de la voz responde a las mismas leyes acústicas en el canto y en el habla. El sonido emitido puede explicarse por las propiedades del espectro de la fuente vocal y los formantes en la acción de cantar y en la de hablar. Desde el punto de vista acústico, los cantantes son personas normales y comunes. Existe, ciertamente, una diferencia esencial en la elección de las frecuencias de los formantes al cantar y al hablar, así como en la pronunciación de las vocales en una y otra acción. Un hombre dotado de una faringe amplia y una laringe que entre en resonancia a una frecuencia entre 2500 y 3000 hertzios puede llegar a desarrollar una buena voz para el canto, mejor que otra persona que carezca de dichas características, y su progreso puede ser más fácil si sus ligamentos vocales le dan una escala que esté de acuerdo con las frecuencias de sus formantes. Por lo que respecta a una cantante, tendría que poder desplazar el primer formante de suerte que coincida con la frecuencia de la nota en la región aguda de su registro; esta condición puede determinar que mujeres con un conducto vocal largo no alcancen un palmarés brillante como soprano de coloratura. Es decir, existen algunas especificaciones morfológicas que, probablemente, inciden en la facilidad con la que una persona puede aprender a cantar bien. Existen otras condiciones que tal vez son más importantes. La reunión de conocimiento, talento e instinto musical configura el concepto de "musicalidad" y es en donde yace la calidad de un excelente cantante, más que en la anatomía de los pulmones y el conducto vocal.

Las rocas más antiguas y la acreción de los continentes

¿Surgió la mayor parte de la corteza continental durante los inicios de la historia terrestre o se adicionó más tarde por procesos tectónicos? La datación de las rocas antiguas apoya el último punto de vista

Stephen Moorbath

La historia de la tierra empezó hace 4600 millones de años, cuando una gran nube de polvo y gases se contrajo y condensó para dar lugar al sistema solar, entre cuyos elementos se encontraba la tierra con una figura y forma parecidas a las que tiene en la actualidad. Se cree que la tierra se condensó con rapidez, posiblemente en el lapso de unos pocos millones de años, y que el proceso de acreción gravitatoria combinado con el desprendimiento de energía, debido a la desintegración de los isótopos radiactivos de vida corta, suministró suficiente calor para que se fundiera y sufriera una pronta diferenciación química que originara un núcleo en gran parte fluido, compuesto de hierro y níquel, y un manto en parte sólido suprayacente a este último y formado, principalmente, por silicatos y óxidos de todos los elementos.

No se ha descubierto aún rocas terrestres cuya edad se aproxime a los 4600 millones de años. Las pruebas que determinan la edad de la tierra se fundan en indicios que se apoyan en el razonamiento indirecto siguiente: En primer lugar, los métodos de datación mediante isótopos radiactivos, como los que se basan en la desintegración del uranio en plomo y del rubidio en estroncio, demuestran que los meteoritos se solidificaron hace unos 4600 millones de años. En la actualidad se cree que los meteoritos representan restos que han quedado después de haberse producido los fenómenos de acreción gravitatoria ocurridos en el sistema solar. En segundo lugar, mediciones similares realizadas en las rocas y suelos más antiguos de la luna proporcionan igualmente una edad cercana a los 4600 millones de años, edad que, referida a nuestro satélite, se interpreta como la del comienzo de su diferenciación en núcleo, manto y corteza.

A pesar de que en la tierra no se ha encontrado rocas con una antigüedad de 4600 millones de años, las mediciones realizadas en rocas pertenecientes a distintas épocas geológicas, para determinar el valor de su contenido en isótopos radiogénicos, plomo 206 y plomo 207, formados respectivamente por desintegración radiactiva del uranio 238 y uranio 235, permiten conjugar los resultados de una manera simple e indicar que, hace 4600 millones de años, las relaciones de abundancia entre los distintos isótopos del plomo eran idénticas en el material del que procedían los meteoritos y en los materiales que originaron la tierra. Cuando la curva de crecimiento de los dos isótopos del plomo se extrapola hacia el pasado, a partir de sus yacimientos más antiguos conocidos, pasa por la composición isotópica de este metal encontrada en muestras pertenecientes al siderito que formó el Meteor Crater, de Arizona, y que está desprovisto de uranio (su edad es de 4600 millones de años). Puesto que el plomo 204 es un isótopo no radiogénico, la cantidad existente del mismo ha sido siempre constante; ello nos sirve de referencia adecuada con la cual comparar los otros isótopos de este metal. La relación existente entre el plomo 207 y el plomo 206 cambia con el tiempo debido a que el uranio 235 se desintegra con mucho mayor rapidez que el uranio 238. Su vida media dura, respectivamente, 710 y 4510 millones de años, y de ahí que casi todo el uranio 235 existente cuando se formó la tierra se haya desintegrado dando plomo 207, de suerte que la relación plomo 207/plomo 204 apenas si aumenta hoy. Además, en la tierra, la relación plomo 206/plomo 204 sigue registrando todavía un aumento rápido, debido a que, hasta ahora, aproximadamente sólo la mitad del uranio 238 que existía al comienzo se ha desintegrado.

De todas maneras, debe tenerse presente que si bien es muy probable que la tierra se formara hace 4600 millones de años, la frase "edad de la tierra", hablando con rigor, remite a un momento, que transcurrió hace un tiempo igual al que se acaba de indicar, en que la composición isotópica del plomo de nuestro planeta era igual a la de los cuerpos celestes de donde proceden los meteoritos. A diferencia de la luna, la tierra ha continuado su evolución como un cuerpo con actividad interna porque su tamaño es lo suficientemente grande como para retener el calor generado por la desintegración de los isótopos radiactivos de vida larga de ciertos elementos (uranio, torio, potasio y rubidio), que se encuentran en pequeñas concentraciones en su manto.

Durante la década 1960-70, las ciencias de la tierra han sufrido una profunda revolución con la aceptación general de la tectónica global. Esta hipótesis unitaria de la historia de la tierra explica de forma satisfactoria la mayoría de los rasgos principales que conforman la superficie del globo, como los continentes, cuencas oceánicas, cadenas de montañas, la distribución de volcanes y terremotos y la distribución, en el tiempo y en el espacio, de los principales tipos de rocas encontrados en la superficie terrestre o en sus proximidades. La hipótesis implica una serie de procesos de primer orden como la creación de nueva corteza oceánica (en las dorsales centro-oceánicas y a través de la subida de materiales procedentes del manto), expansión de los fondos oceánicos, deriva de los continen-

tes, subducción de la corteza oceánica (empujada en dirección a, y por debajo de, la corteza continental, más ligera), creación de nuevas rocas ígneas por fusión parcial de la corteza oceánica que ha sufrido subducción, con la consiguiente adición de material granítico nuevo en los bordes continentales y colisión de continentes, como resultado de la subducción completa de la corteza oceánica y el cierre de los océanos; la colisión conduce al engrosamiento de la corteza continental y a la creación de cordilleras como los Alpes y el Himalaya.

Hoy en día se interpreta que la configuración actual de los continentes es una consecuencia del episodio más reciente de la deriva continental, el cual empezó hace aproximadamente sólo unos 200 millones de años. Seiscientos, o quizás mil millones de años atrás, los antecesores de los continentes actuales se encontraban juntos, formando un inmenso supercontinente, denominado Pangea, cuyo origen puede remontarse a épocas muy lejanas (unos 2700 millones de años). La grandiosidad de esta idea es realmente sobrecogedora. Solamente unos pocos pioneros, de la generación precedente de científicos dedicados al estudio de las ciencias de la tierra, vieron lo que se avecinaba. De entre ellos, hay que considerar como a un verdadero titán al geólogo británico Arthur Holmes, que tenía una fe absoluta en la coherencia fundamental e interdependencia de todos los fenómenos geológicos, mostrándose igualmente pionero en el desarrollo y aplicación de las técnicas de datación mediante isótopos, esenciales para esta cuestión.

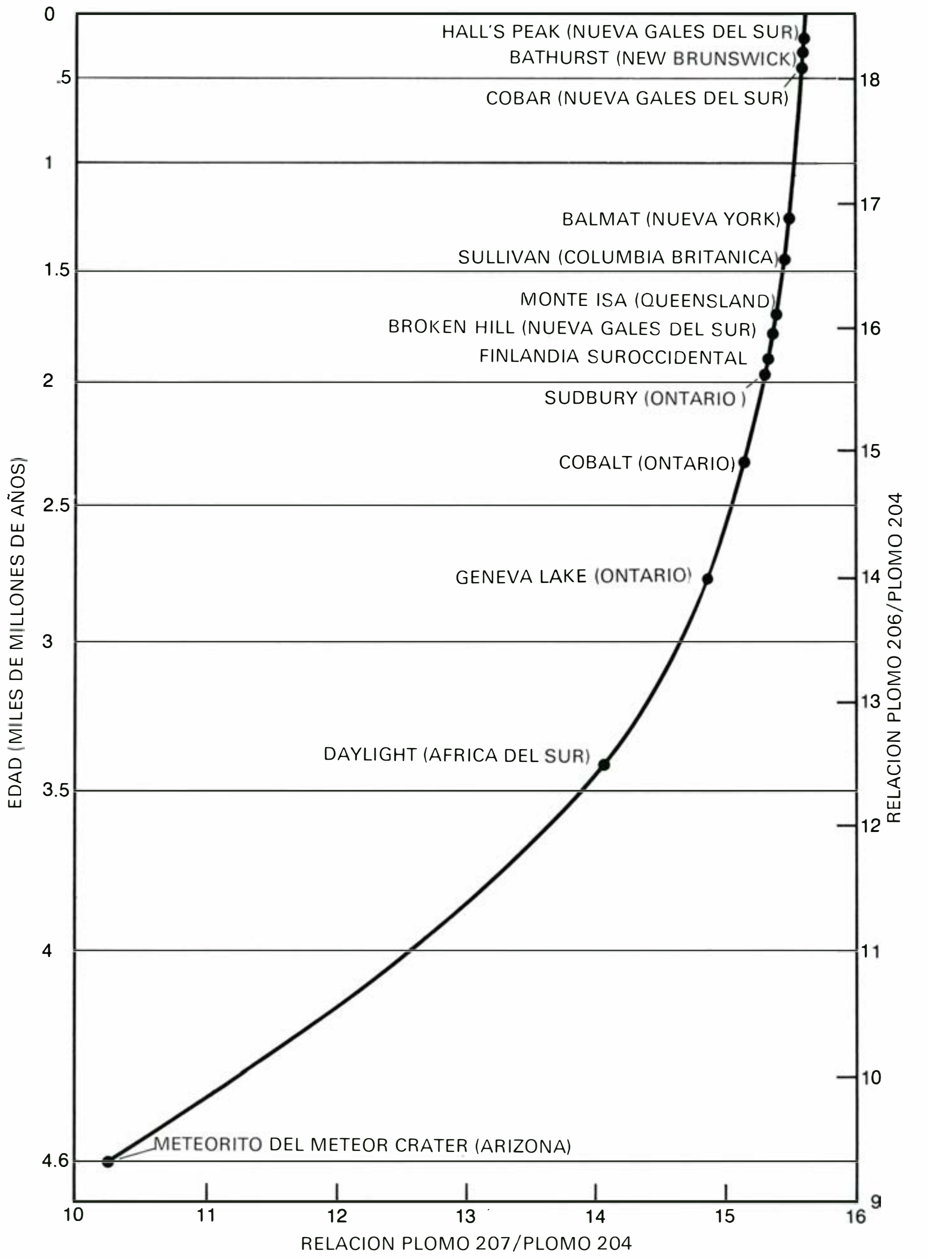
Mis investigaciones se han centrado en el origen de la corteza continental y en los fenómenos de acreción y desarrollo de la misma a lo largo de los tiempos geológicos. Ello ha supuesto un estudio exhaustivo por tratar de localizar las rocas más antiguas de la tierra y la comparación detallada de rocas antiguas con otras que lo son mucho menos y cuyo origen y significado se conocen bien.



ENTRE LAS ROCAS MAS ANTIGUAS de la tierra existe una secuencias de rocas ígneas metamórficas e intensamente deformadas que han recibido el nombre de gneises de Amîtsoq (en groenlandés, estéril). En esta fotografía, realizada en la costa occidental de Groenlandia, cerca de su capital, Godthaab, aparecen los gneises a la derecha y en primer término. Las dataciones, realizadas con métodos radiactivos, demuestran que la roca cristalizó hace 3750 millones de años. La gran masa oscura de la izquierda, que corta al gneis, forma parte de un dique de lava solidificada. Otro dique, de poco espesor y tonalidad clara, de unos 2600 millones de años de antigüedad corta al gneis y al dique anterior.

A finales del siglo XVIII. James Hutton introdujo en geología la doctrina del uniformitarismo, según la cual el presente encierra la llave del pasado. Puesto que carecemos de una máquina del tiempo, como la de H. G. Wells, para transportarnos hacia el pasado, lo mejor que pueden hacer los geólogos es comprobar la doctrina de Hutton en las rocas. Los conceptos e hipótesis de la tectónica global moderna, perfectamente establecidos para los últimos centenares de millones de años de la historia de tierra, ¿pueden extenderse hasta el remoto pasado geológico, e incluso hasta el propio comienzo de su historia? Creo que una forma modificada de uniformitarismo puede extenderse realmente hasta épocas muy lejanas en el tiempo, mucho más de lo que hasta ahora se había pensado. Unas tres décimas partes de la superficie sólida de la tierra están ocupadas por corteza continental, es decir, por los materiales que constituyen los continentes y sus plataformas circundantes. El resto de superficie sólida es corteza oceánica, cuyas características son, empero, diferentes.

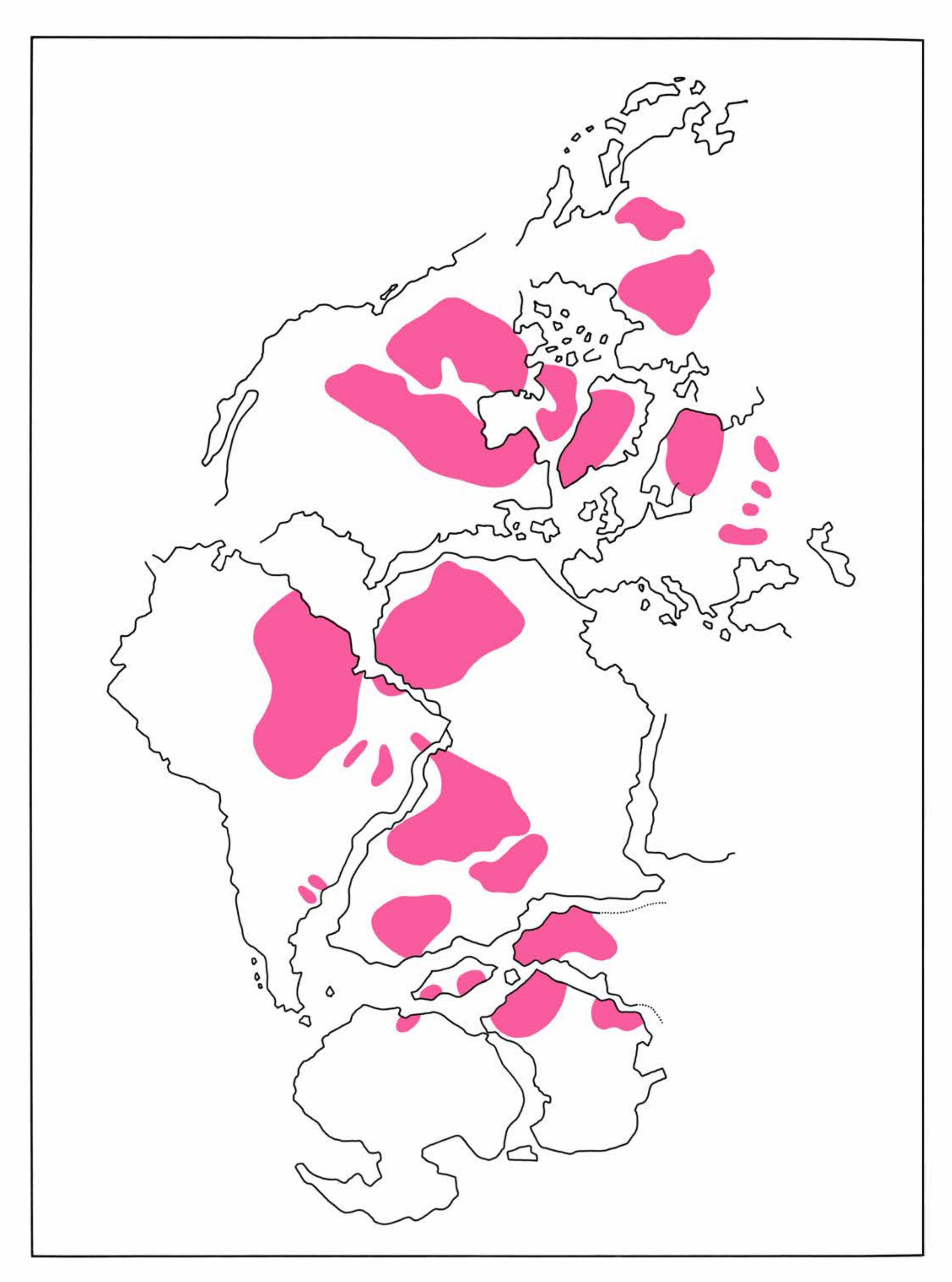
La corteza continental tiene una densidad media de 2,7 gramos por centímetro cúbico; para la corteza oceánica, el valor correspondiente es de 3 gramos, mientras que para el manto superior es de 3,4 gramos. La corteza continental tiene un espesor mucho mayor que la corteza oceánica hasta llegar hasta su contacto con el manto, con valores medios de 35 a 40 km (que pueden situarse entre 60 y 70 km en las cordilleras) mientras que la corteza oceánica tiene valores medios de solamente 6 km. La edad de la corteza continental es muy superior a la edad de la corteza oceánica (llegando a tener en algunos puntos hasta más de 2700 millones de años), la cual, en ningún punto, posee una edad superior a los 200 millones de años. La corteza continental tiene, asimismo, una estructura geológica complicada y una composición química variable, diferenciándose también en esto de la corteza oceánica, que posee una estructura estratificada bastante simple en comparación y una composición química uniforme.



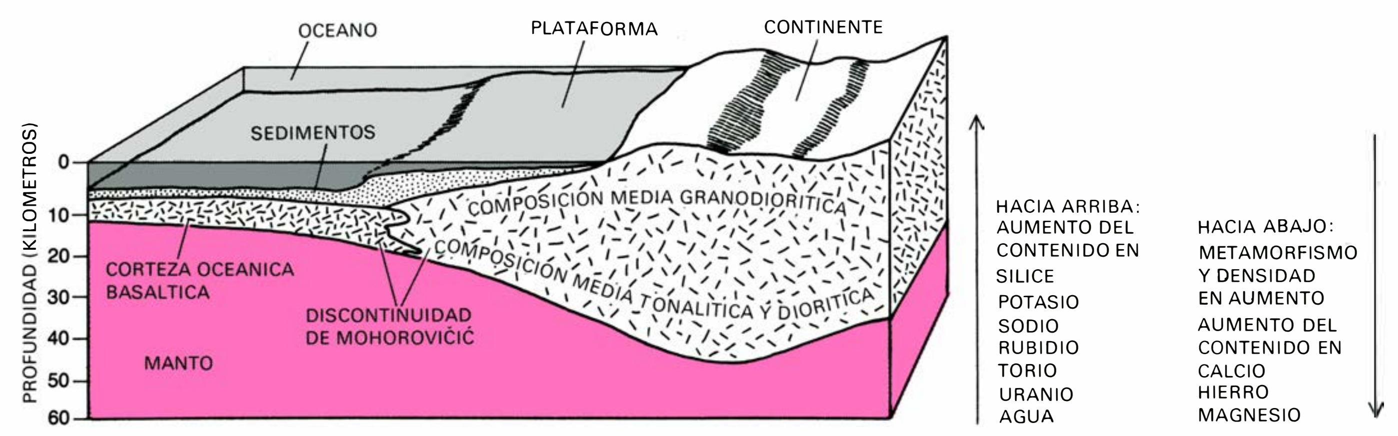
EL METODO DEL PLOMO-PLOMO para determinar la edad de la tierra se basa en la variación de las relaciones entre los isótopos del plomo en el curso de los tiempos geológicos. El isótopo de referencia, el plomo 204, no se forma por desintegración radiactiva; por tanto, la cantidad del mismo existente en la tierra ha sido siempre la misma. El plomo 206 y el 207 se forman, respectivamente, por la desintegración del uranio 238 y del 235. Este último tiene una vida media mucho más corta (710 millones de años) que el uranio 238 (4510 millones de años). Según esto, la mayor parte del uranio 235 existente al comienzo se ha desintegrado de forma que la relación entre plomo 207/plomo 204 ha variado relativamente poco en los últimos 2000 millones de años. Sin embargo, la relación entre plomo 206/plomo 204 continúa aumentando de forma significativa. La curva de crecimiento para las dos relaciones puede determinarse con precisión. En la curva se sitúan las edades de algunos yacimientos importantes de plomo. Cuando la curva de crecimiento de las citadas relaciones se extrapola hacia el pasado, da una edad de 4600 millones de años para los fragmentos del siderito que produjo el Meteor Crater de Arizona (Ilustración de A. Tomko.)

La parte superior de la corteza continental, entre los 10 y los 20 km, consta principalmente de rocas ígneas y metamórficas, recubiertas en muchos sitios por rocas sedimentarias. La composición química media del conjunto superior de las rocas continentales es la correspondiente a una granodiorita (roca ígnea muy frecuente), la cual está compuesta por óxidos combinados químicamente, según las siguientes proporciones aproximadas: óxido de silíceas ($Si\ O_2$), 66 por ciento; óxido de potasio (K_2O), 3 por ciento; óxido de sodio (Na_2O), 4 por ciento; óxido de calcio (CaO), 5 por ciento; óxido de magnesio (MgO), 2 por ciento, y óxidos de hierro (FeO y Fe_2O_3), 4 por ciento. Se encuentran otros óxidos en cantidades menores.

La parte superior de la corteza continental pasa gradualmente en profundidad a unas rocas, con un metamorfismo cada vez mayor, denominadas gneises. En sentido amplio, los gneises son equivalentes, de alta presión y temperatura, de las rocas que hay sobre ellos, pero su mineralogía es más simple y su composición química más básica, es decir, son más pobres en óxido de silicio. La composición química media se parece a la composición de las dioritas y tonalitas (rocas ígneas frecuentes), las cuales, comparadas con la parte superior de la corteza continental, tienen menos silicio, potasio y sodio y más calcio, magnesio y hierro. Así pues, los gneises son rocas de composición química intermedia entre los valores medios que presenta la



LOS ANTEPASADOS de los continentes actuales formaron parte de un supercontinente denominado Pangea y empezaron a derivar, fragmentándose, hace unos 200 millones de años. Las regiones coloreadas representan aquellas zonas cuya edad supera los 1600 millones de años.



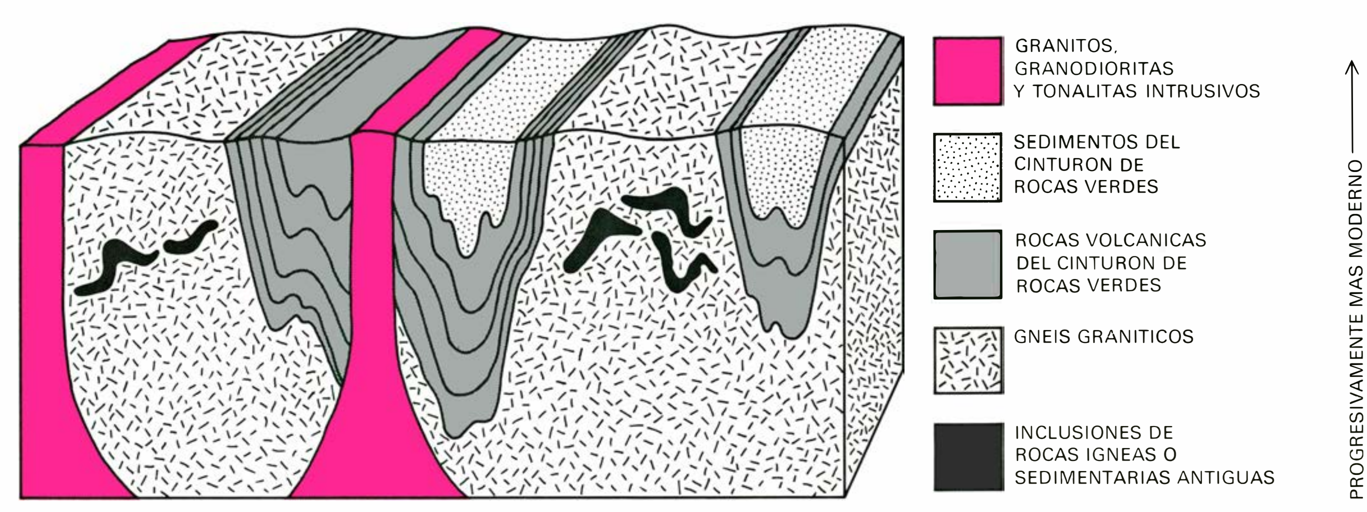
LA CORTEZA CONTINENTAL tiene un espesor notoriamente mayor (y es menos densa) que la corteza oceánica. Esta tiene una composición muy homogénea mientras que aquélla presenta una estructura complicada y una composición variable, según puede leerse a la derecha.

parte superior de la corteza continental y los que se encuentran en la corteza oceánica. Esta última es relativamente pobre en silicio (49 por ciento de SiO_2), potasio (1 por ciento de K_2O) y sodio (3 por ciento de Na_2O) y relativamente rica en calcio (11 por ciento de CaO), magnesio (8 por ciento de MgO) y hierro (9 por ciento de FeO y Fe_2O_3). Los gneises de la parte inferior de la corteza continental están igualmente muy empobrecidos en agua de combinación y en ciertos oligoelementos "incompatibles", entre los que hay que contar los elementos radiactivos uranio, torio y rubidio, además de otros muchos. Esta incompatibilidad obedece a que los tamaños y afinidades químicas de los átomos de tales elementos les impiden acomodarse fácilmente a las estructuras cristalinas densas y compactas, que son estables a las elevadas presiones y temperaturas de la parte inferior de la corteza continental y del manto subyacente.

A pesar de que esta parte inferior de la corteza continental y el manto contienen solamente pequeñas trazas de los elementos incompatibles, esas trazas proporcionan al manto radiactividad suficiente como para alimentar energéticamente la máquina térmica de la tierra, que es, a su vez, el motor de la tectónica global. Existe, igualmente, una fuerte tendencia por parte de los elementos incompatibles (entre los que, debido a un accidente natural extraordinario, se encuentran todos los radiactivos) a migrar hacia la parte superior de la corteza continental, en donde se acomodan con mayor facilidad dentro de las estructuras cristalinas relativamente abiertas de los silicatos y óxidos allí localizados. La gradación vertical que se observa en la composición de la corteza continental es un fenómeno cuyo significado ha sido estimado en todo su valor sólo en los últimos años.

Existen varias teorías enfrentadas en relación con el origen y evolución de la corteza continental. Una hipótesis extrema propugna que la mayor parte de ella, aunque también pudiera ser su totalidad, se formó en una etapa inicial durante el transcurso de la diferenciación química de la tierra y que, desde entonces, ha sido removilizada, es decir, calentada, fundida, recristalizada y deformada. Indudablemente, los efectos de tales procesos pueden observarse en muchas partes de la corteza continental, especialmente en las cordilleras montañosas y en los puntos en donde afloran las raíces de las cadenas montañosas antiguas, pero la esencia de ese enfoque reside en que el volumen de esta corteza ha sido casi constante desde los tiempos más primitivos.

Otro punto de vista, que el autor comparte con otros muchos investigadores, consiste en pensar que el volumen y extensión de la corteza continental primitiva fueron relativamente pequeños y que han ido creciendo a lo largo de los tiempos geológicos por la irreversible diferenciación química del manto superior, seguida de la adición de material nuevo diferenciado a los continentes preexistentes, especialmente en sus márgenes o en las cercanías de éstos. El proceso



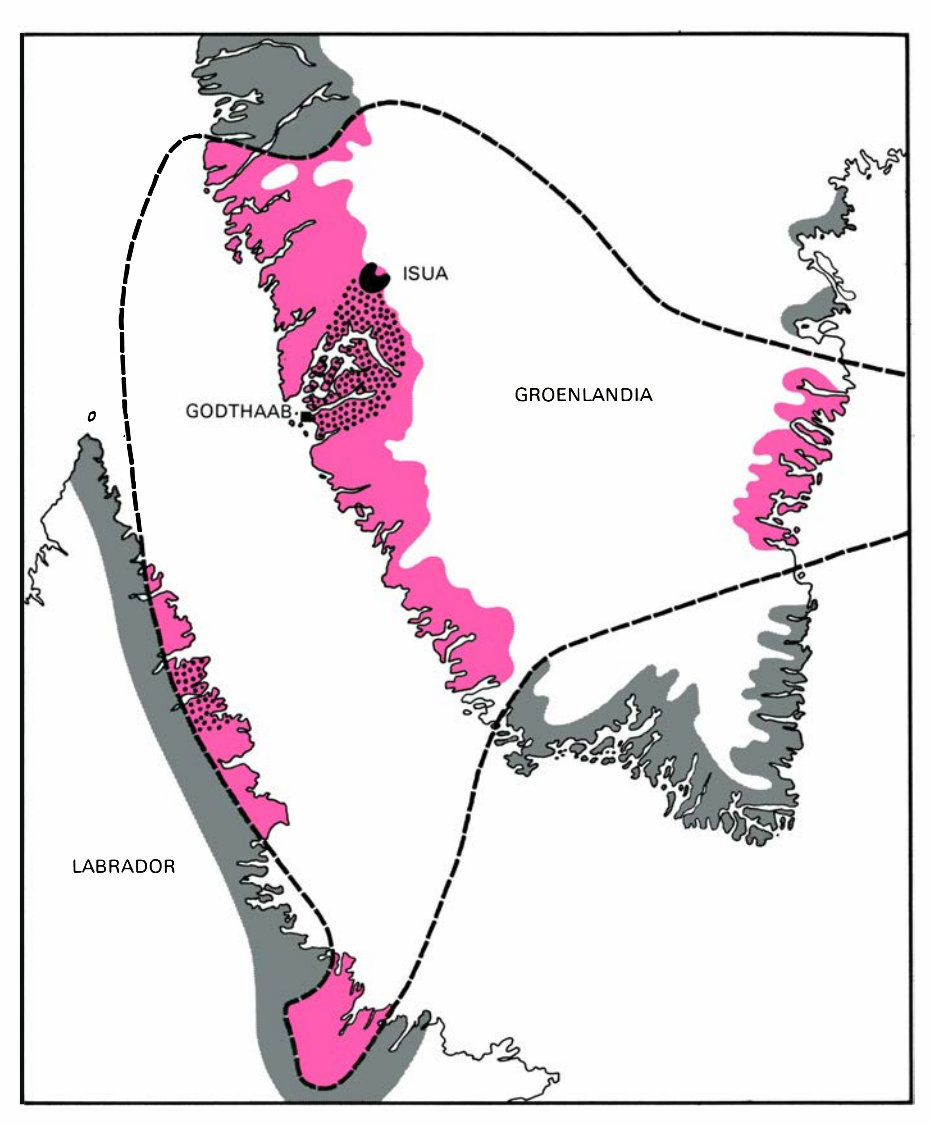
UN ESCUDO ARCAICO TIPICO, en donde se encuentren las rocas más antiguas de la tierra, estará formado sobre todo por cinturones de rocas verdes interpuestas en extensas zonas constituidas por gneis granítico. Los símbolos convencionales de la derecha indican las edades relativas de los cinco principales tipos de rocas que se observan en el corte. Se ha exagerado la escala vertical. Los cinturones de rocas verdes están formados por rocas volcánicas y sedimentarias. Los gneises graníticos están constituidos por gneises bandeados y deformados, granodioríticos y tonalíticos, derivados de rocas ígneas. Las inclusiones son restos arrancados a cinturones de rocas verdes más antiguos todavía.

según el cual se produce este fenomeno podría ser análogo al que ocurre en la actualidad en los bordes occidentales de América del Sur y Norteamérica, que se están moviendo hacia el oeste por encima de la corteza oceánica, más densa, del Pacífico. A medida que la corteza oceánica sufre una subducción hacia niveles más profundos se va calentando de forma progresiva hasta que funde parcialmente, produciendo rocas más ligeras y más sencillas de la familia diorita-tonalita - granodiorita, "calco-alcalina", que alimentan los insaciables volcanes situados en la costa occidental del continente americano. La cuña de manto superior, suprayacente a la corteza oceánica profunda, que ha sufrido subducción y que está por debajo de la corteza continental antigua, se funde también parcialmente para originar nuevas rocas basálticas y calco-alcalinas. El material "ultrabásico" restante, denso y sin fundir, se hunde gradualmente en el manto, sin volver a tomar parte en la producción de corteza continental más ligera.

El magma calco-alcalino recién formado cristaliza poco a poco dentro de la corteza, dando lugar a batolitos, que son masas inmensas de rocas ígneas de grano grueso. Solamente una pequeña parte del magma así constituido sale al exterior en forma de lava. El levantamiento de partes de la corteza continental, acaecido durante las últimas decenas de millones de años, ha permitido que la erosión pusiera al descubierto muchos batolitos. Entre los mejor conocidos se encuentran el de Sierra Nevada, el de California y el andino. Muchos geólogos creen que tales masas de roca corresponden a auténticas adiciones de material nuevo a la corteza continental. Esto no excluye la posibilidad de que este nuevo material calco-alcalino haya incorporado una pequeña cantidad de rocas continentales más antiguas refundidas, procedentes del borde continental preexistente. Sin embargo, algunos investigadores sostienen que estos grandes batolitos de granodiorita y tonalita son fundamentalmente corteza continental más antigua, removilizada y parcialmente fundida. La importancia de esta cuestión en relación con la controversia que enfrenta "removilización continental" versus "acreción continental" se verá en seguida con toda claridad. Antes de describir un método que puede utilizarse para abordar esta cuestión fundamental indicaré brevemente qué tipos de rocas pueden aclararnos algo acerca de la parte identificable más remota de la historia de la tierra.

En cada continente existen grandes "escudos" de edad precámbrica compuestos de rocas ígneas y sedimentarias muy variadas, cuyas edades, basándose en las dataciones mediante isótopos radiactivos, están comprendidas entre los 2500 y 2800 millones de años. Se considera que las rocas precámbricas, con una antigüedad superior a los 2500 millones de años, pertenecen al Arcaico. Hace unos 2500 millones de años, el continente norteamericano quizá tenía una extensión que alcanzaba hasta un 50 por ciento de su superficie actual, y algo parecido debe ocurrir probablemente con los otros continentes. Además, los espesores observados en las series de rocas arcaicas, junto con los resultados de los estudios sobre las asociaciones minerales de alta presión y temperatura, existentes en rocas de esa edad que afloran en la superficie terrestre ocasionados por levantamiento y erosión, no dejan lugar a dudas de que, durante el Arcaico superior, la corteza continental tenía un espesor medio variable entre 25 y 40 km, parecido al que se observa hoy en día. Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias más dispares se estaban formando ya, debido a una serie de procesos geológicos que difícilmente serían menos variados que los observados en tiempos mucho más recientes, sólo que los organismos vivientes desempeñaron únicamente un papel pequeño en los procesos de formación de rocas.

En los grandes escudos de la tierra existen dos grupos principales de rocas del Arcaico superior: las bandas de rocas verdes *(greenstone)* y los gneises graníticos. Las primeras se llaman así por el tinte verdoso de toda una serie de rocas



EL ESCUDO ARCAICO DE GROENLANDIA abarca la costa del Labrador, a la que estaba unido antes del episodio más reciente de deriva continental. Las dos masas continentales se hallan hoy unas tres veces más separadas de lo que indica el mapa. La línea de trazos discontinuos encierra el escudo del Precámbrico inferior (Arcaico). La zona coloreada consta, principalmente, de rocas cuya edad oscila entre 2600 y 2900 millones de años. Los puntos negros dentro de esta última son rocas de edad comprendida entre 3600 y 3800 millones de años. La media luna, en negro, en Isua, donde se encuentra un rico yacimiento de hierro, indica la localización de una extensa formación de rocas supracorticales (depositadas sobre una corteza preexistente) que resultaron tener una edad de 3800 millones de años. En gris, zonas con predominio de rocas precámbricas modernas.

volcánicas metamórficas; constan principalmente de rocas sedimentarias y volcánicas depositadas en la superficie, tanto en tierra firme como bajo el agua, por lo que, en conjunto, reciben el nombre de rocas supracorticales. En un cinturón de rocas verdes típico, la actividad volcánica produjo, en sus comienzos, lavas básicas y ultrabásicas que, según se cree, son el resultado de una fusión parcial muy acentuada en el manto superior subyacente durante un período en que se estaba disipando mucho calor. En algunos cinturones de rocas verdes, las rocas volcánicas sucesivas de una secuencia van enriqueciéndose progresivamente en silicio, potasio, sodio y aluminio, y empobreciéndose en magnesio, hierro, y calcio; van generando, asimismo, basaltos, andesitas y dacitas. El sentido de la variación global oscila desde las rocas "básicas" a las "ácidas", pasando por las "intermedias", según queden definidas por su contenido en óxido de silicio. Suele predominar el basalto; en la zona superior de las secuencias adquieren importancia las rocas sedimentarias, seguramente debido a las tierras que estaban emergiendo. La secuencia de rocas verdes mejor estudiada es la de Swaziland, en la zona de Barbeton Mountain Land (Africa sudoriental), en donde llega a tener un espesor de unos 20 km.

Las rocas verdes del Arcaico presentan diversos grados de alteración metamórfica y de recristalización. Este tipo de efectos puede ser muy débil, hasta el extremo de que las lavas y los sedimentos antiguos parecen como si acabaran de ser depositados. Ello ocurre, por ejemplo, en determinadas partes del escudo canadiense y sudafricano. En estos casos, el continente ha sufrido pocos movimientos de ascenso vertical en los últimos 2800 millones de años y las rocas no han llegado a profundidades de más de 10 km bajo la superficie, alcanzando en otros sitios entre los 10 y 30 km, tal como lo demuestra su intensa deformación y recristalización. Así, por ejemplo, los basaltos se convierten en sus equivalentes metamórficos (anfibolitas), las lutitas en esquistos y las calizas en mármoles. Sin embargo, las características esenciales de la asociación supracortical completa no pueden destruirse, permaneciendo siempre claramente distinguibles. Muchos cinturones de rocas verdes son bandas discontinuas y restos erosionados de lo que en otro tiempo pudo haber sido una cuenca de deposición continua. Estos restos suelen ocupar típicamente superficies del orden de varios centenares de kilómetros cuadrados. Generalmente están rodeados por inmensos "mares" de gneises, que son los equivalentes metamórficos de rocas ígneas como las granodioritas y las tonalitas. Las clases de rocas realmente predominantes en el Arcaico son estos tipos de gneises, que llegan a presentarse en afloramientos que ocupan extensiones de millares de kilómetros cuadrados. A pesar de la estrecha yuxtaposición entre bandas de rocas verdes y terrenos formados por gneises graníticos no siempre se puede estar completamente seguro de cuál de estas dos formaciones sea más antigua y cuál más moderna; pudo haber existido una intensa deformación que no haya conservado las relaciones entre los contactos originales.

SUCESO NUMERO	AÑOS (MILES DE MILLONES)	DESCRIPCION
1	?	Formación de una corteza terrestre de tipo desconocido; imposible de distinguir hoy en día.
2	~3.8	Erupción de lavas volcánicas y deposición de rocas sedimentarias (algunas en medio acuoso responsables de la formación del cinturón supracortical de Isua y las inclusiones de los gneises de Amîtsoq.
3	~3.75	Intrusión de las rocas madres de los gneises de Amîtsoq: granodioritas, tonalitas y dioritas.
4	~3.7	Deformación y metamorfismo (recristalización) de las rocas supracorticales anteriores y de las rocas ígneas. Formación de los gneises de Amîtsoq.
5	?	Intrusión de numerosos diques basálticos (diques de Ameralik) en todas las rocas anteriores.
6	~2.9+	Erupción de lavas volcánicas y deposición de sedimentos sobre la corteza anterior.
7	~2.9	Intrusión de grandes masas ígneas de anortosita (rocas formadas por silicatos cálcicos y alumínicos).
8	~2.8	Intrusión de cantidades enormes de granodioritas y tonalitas, rocas madres de los gneises de Nûk.
9	~2.7	Nueva etapa de deformación y metamorfismo sobre las rocas anteriores. Formación de los gneises de Nûk.
10	~2.6	Intrusión del granito de Qôrqut.
11	~2.2+	Intrusión de numerosos diques basálticos.
12	~1.6	Calentamiento de toda la zona.

SECUENCIA DE LOS ACONTECIMIENTOS GEOLOGICOS acaecidos en el escudo arcaico de la costa occidental de Groenlandia, en los alrededores de Godthaab y de Isua *(véase el mapa de la página anterior)*, **propuesta por McGregor a finales de la década 1960-70. La mayoría de las mediciones de edad absoluta que aquí se dan se realizaron en el laboratorio del autor.**

Los geólogos mantienen una encendida controversia sobre las edades relativas de los cinturones de rocas verdes y de los terrenos formados por gneises graníticos. Muchos creen que las bandas de rocas verdes se depositaron en un medio oceánico primitivo (representan de hecho antiguos océanos) y que los gneises graníticos son quizá los restos de continentes antiguos. Es el clásico dilema del huevo y la gallina: ¿qué existió primero, los continentes o los océanos? ¿Qué relación guardaban entre sí en el Arcaico? Los procesos tectónicos globales modernos pueden formar continentes a partir de la corteza oceánica: ¿ocurrió lo mismo durante el Arcaico? Además, ¿existen pruebas reales de que los cinturones de rocas verdes de los períodos terminales del Arcaico y los gneises graníticos sean océanos y continentes primordiales, tal como algunos autores han sugerido? Tales son los problemas que hoy ocupan el centro de interés de muchos proyectos de investigación.

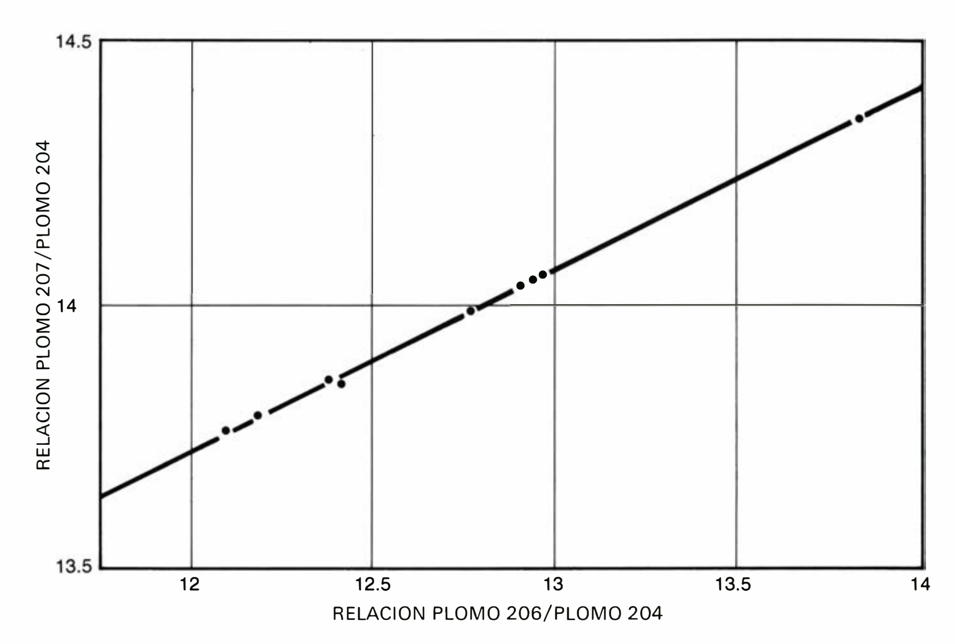
Consideremos ahora las edades de los gneises graníticos más antiguos infrayacentes a ciertos cinturones de rocas verdes. ¿Existen rocas en la superficie terrestre con edades superiores a los 2800 millones de años? Si ello es así, ¿cómo son? ¿Cuánto podemos aproximarnos al límite de la edad de la tierra (4600 millones de años)?

En 1966, un joven geólogo neozelandés, V. R. McGregor, que trabajaba para el Servicio Geológico de Groenlandia, había empezado una cartografía geológica detallada en la agreste zona montañosa que rodeaba a Godthaab, la capital de la isla. La gran variedad y la estructura compleja de las rocas dificultaban el trabajo, pero, tras varios años de investigación, McGregor pudo identificar una secuencia característica de acontecimientos geológicos. Las rocas que originalmente se dieron como más antiguas fueron los gneises de Amîtsoq, formados por una secuencia de rocas ígneas metamorfoseadas y diversamente deformadas, de carácter típicamente continental, entre las que se contaban las granodioritas, tonalitas y dioritas. Al principio, no

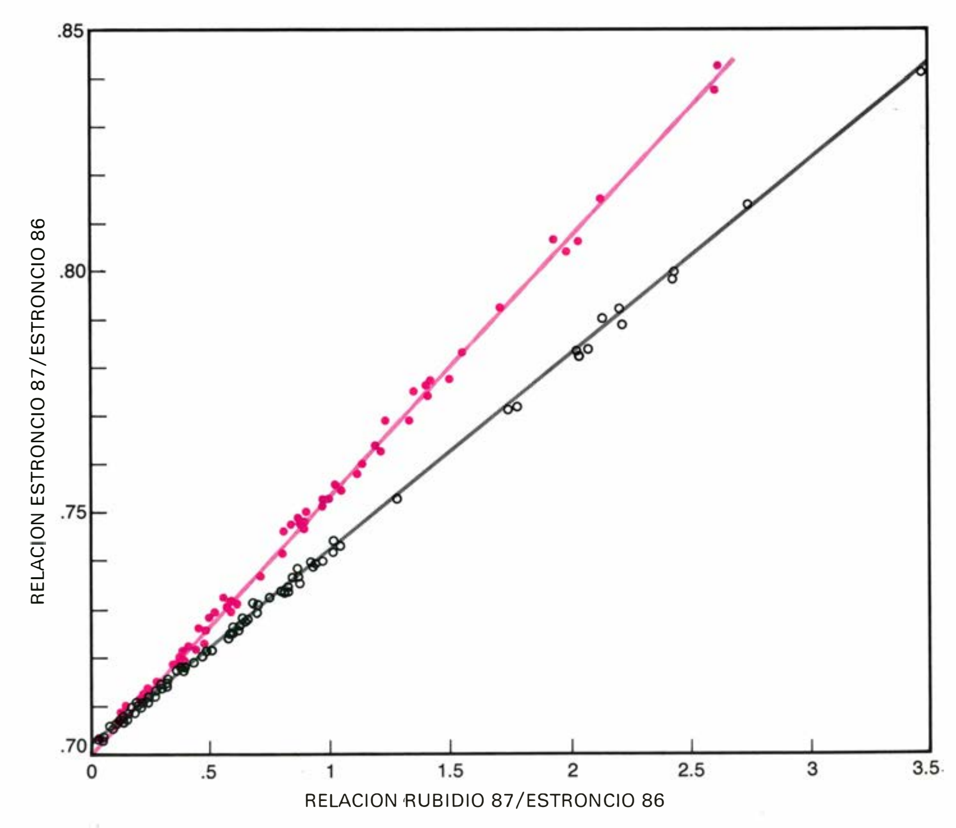
se aceptó en general la interpretación que McGregor dio a la secuencia. A partir de una medición, llevada a cabo algunos años antes por Ole Larsen, de la Universidad de Copenhague, utilizando el método del potasio-argón, se obtuvo una clave para descifrar las edades absolutas de estas rocas. La medición, verificada sobre un mineral extraído del granito tardío de Qôrqut, dio una edad de 2600 millones de años. McGregor había atribuido el granito en cuestión a un acontecimiento geológico tardío, el número 10 de la secuencia establecida por él. Razonó de la siguiente forma: si las rocas asociadas con el acontecimiento número 10 tenían una edad de 2600 millones de años, las que estaban asociadas con el acontecimiento número 3 podrían ser las más antiguas jamás encontradas en la tierra. (Hasta entonces no se había encontrado todavía las rocas asociadas con los acontecimientos números 1 y 2.)

Cuando en 1970 me enteré, por primera vez, de los hallazgos de McGregor y de las dudas acerca de su validez expresadas en algunos centros científicos, pensé que se podría resolver el problema llevando a cabo determinaciones de edad absoluta, recurriendo a los métodos del rubidio-estroncio y uranio-plomo, con muestras procedentes de los gneises de Amîtsoq. McGregor envió algunas muestras a la Universidad de Oxford donde las investigaciones, llevadas a cabo por L. P. Black, N. H. Gale, R. J. Pankhurst y por el autor, demostraron en seguida que se trataba de las rocas más antiguas de todas las conocidas hasta la fecha y que, quizá, su edad estaba comprendida entre 3600 y 4000 millones de años.

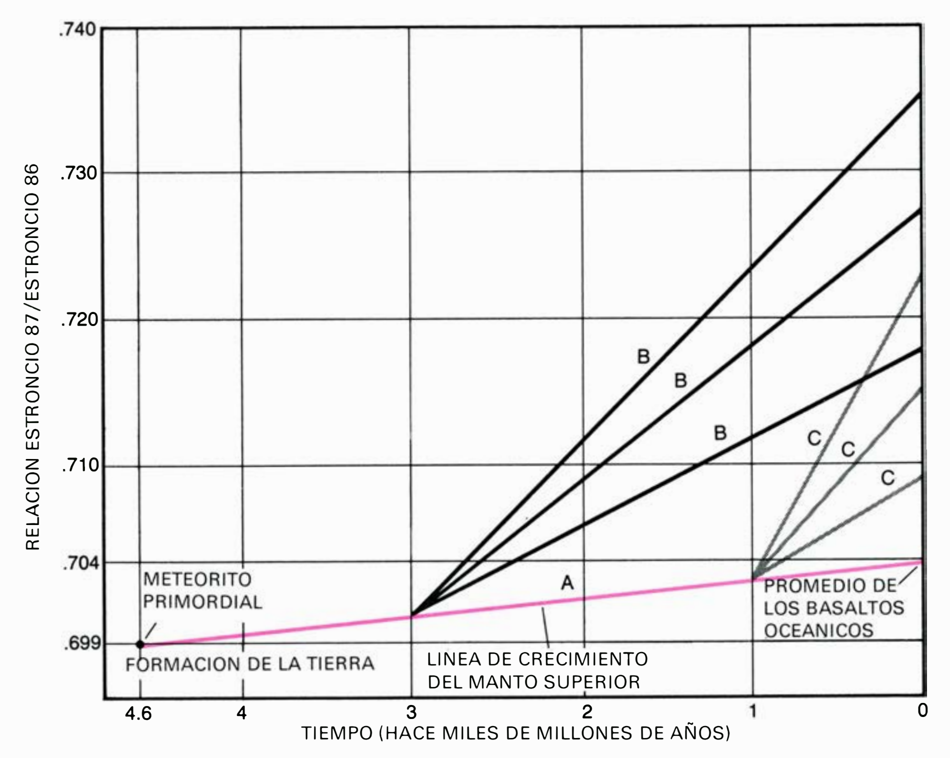
Nos faltaban muestras adecuadas para establecer una edad más exacta y, por tanto, decidí con McGregor, y con la ayuda del Servicio Geológico de Groenlandia, llevar a cabo una amplia recogida de muestras en la región de Godthaab y especialmente en las zonas en donde él había identificado los gneises de Amîtsoq, durante el verano de 1971. Las subsiguientes dataciones que se hicieron en Oxford sobre todas las muestras confirmaron una edad de unos 3750 millones de años, que consideramos hoy en día cercana a la de las rocas ígneas precursoras de los gneises, cuando se separaron de sus fuentes de origen en el manto superior para formar esta corteza continental antigua y única, pero que no por ello deja de ser típica. Muy útil fue la confirmación de esta edad antigua, en 1973, por parte de Halfdan Baadsgaard, de la Universidad de Alberta. Baadsgaard, utilizando el método del uranio-plomo, dató en 3700 millones de años al



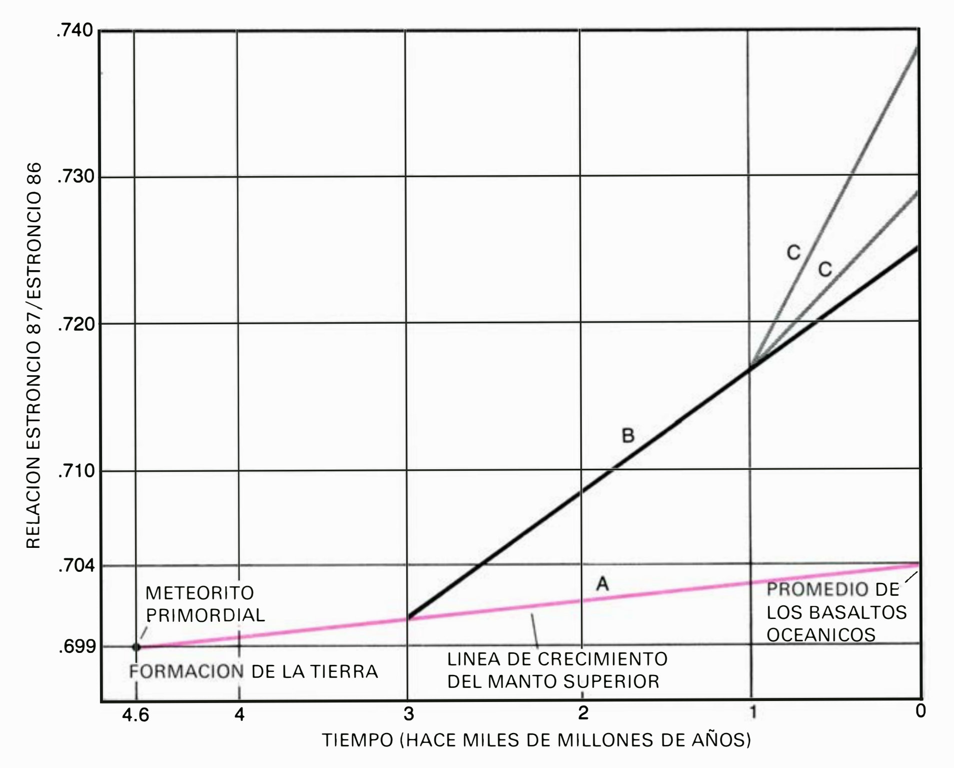
LAS DETERMINACIONES DE EDAD por el método del plomo-plomo, y para muestras de una formación sedimentaria de hierro bandeado existente en Isua (Groenlandia occidental), indican que los sedimentos se depositaron hace 3800 millones de años. Tal como aparece en el gráfico de la página 68, el plomo 206 se produce por desintegración radiactiva del uranio 238 (muy abundante aún); el plomo 207 resulta de la desintegración del uranio 235, mucho más raro. Al ser constante, a lo largo del tiempo, la cantidad de plomo 204, la relación plomo 206/plomo 204 aumenta más rápidamente que la relación plomo 207/plomo 204. Para las muestras de Isua, la pendiente de la línea determinada por las dos relaciones corresponde a 3800 millones de años, que es la edad más antigua registrada hasta ahora en una roca terrestre. (La ilustración ha sido realizada por A. Tomko)



EL DIAGRAMA DE ISOCRONAS, por el método rubidio-estroncio, de dos grupos de gneises arcaicos de Groenlandia, indica que uno de ellos es 900 millones de años más antiguo que el otro. Igual que en el método del plomo-plomo, se compara la variación de dos relaciones isotópicas. El isótopo que aquí permanece constante a lo largo del tiempo es el estroncio 86. La cantidad de rubidio 87, con una vida media de 50.000 millones de años, disminuye lentamente, por desintegración, al dar estroncio 87. De aquí que cuanto más rubidio 87 haya inicialmente en una muestra, en comparación con el contenido de estroncio 86, con tanto mayor rapidez aumentará a lo largo del tiempo la relación estroncio 87/estroncio 86. Las dos líneas isocronas corresponden a muestras de roca total de los gneises de Amîtsoq *(en color)* y de los de Nûk *(en negro).* Cuanto más pronunciada sea la pendiente, más antigua será la roca. Por consiguiente, los primeros tienen una edad de 3750 millones de años y, los segundos, otra de 2850. Las intersecciones con el eje vertical representan los valores iniciales de la relación estroncio 87/estroncio 86 en aquellas mismas épocas.



LA RELACION ESTRONCIO 87/ESTRONCIO 86 en el manto superior de la tierra ha aumentado desde 0,699 hasta 0,704 (*línea A*) en el transcurso de 4600 millones de años, ya que el rubidio 87 se ha desintegrado lentamente en estroncio 87. Tal como se explicaba en la ilustración anterior, las rocas con relaciones de rubidio 87/estroncio 86 más elevadas presentan aumentos más pronunciados en la relación estroncio 87/estroncio 86. Proyectando estas relaciones, y extrapolándolas hacia el pasado, se puede saber si unos materiales con relaciones diferentes tuvieron un origen común, pudiéndose igualmente conocer la relación inicial estroncio 87/estroncio 86. Si esta última se encuentra sobre la línea *A* significa que el material se formó a partir del manto superior (o de corteza oceánica derivada del manto) y no de corteza continental refundida. Así pues, la líneas *B* y *C* representan material derivado del manto hace tres mil y mil millones de años, respectivamente.



LA REMOVILIZACION DE LA CORTEZA CONTINENTAL se pone de manifiesto si las pendientes de las líneas de crecimiento para la relación estroncio 87/estroncio 86 convergen en valores significativamente mayores que los que cabría esperar para el manto superior. En este ejemplo, el material del manto que se había convertido en corteza continental hace tres mil millones de años (*línea B*) fue refundido y removilizado hace mil millones de años, dando lugar a dos líneas de crecimiento (*C*) con una relación inicial estroncio 87/estroncio 86 cuyo valor resultaba ser 0,717.

mineral raro circonio (silicato de circonio), extraído de varias muestras del gneis de Amîtsoq.

En 1971, con mis colegas, pudimos confirmar que el acontecimiento número 8 de la secuencia de McGregor ocurrió hace unos 2850 millones de años y que el granito tardío de Qôrqut se emplazó en la corteza hace 2600 millones.

Estas rocas, las más modernas de la región de Godthaab, son casi tan antiguas como las de mayor edad de las conocidas hasta la fecha en otras zonas. De hecho, no hay que olvidar que era más o menos en esta época cuando los geólogos lunares empezaban a dar edades similares a las de los gneises de Amîtsoq para los basaltos de los *maria* o "mares" de la luna, cuya carencia absoluta de relación con aquéllos es indudable.

Se sabe que los gneises de Amîtsoq han sufrido un recalentamiento y una deformación intensa durante una serie de acontecimientos geológicos que se produjeron hace 2600-2900 millones de años. Muchos se preguntan cómo es posible obtener una edad fidedigna de 3750 millones de años para unas rocas que sufrieron una fuerte alteración casi mil millones de años más tarde. Debe responderse que, en la actualidad, los geocronólogos utilizan el método de análisis denominado de "roca total", tomando como base para la datación los sistemas rubidio-estroncio y uranio-plomo. Este método emplea muestras de roca que pesan por lo menos cinco kilogramos y que quedan sometidas a una molienda completa hasta obtener un polvo fino del que se separan pequeñas muestras representativas destinadas a los análisis de laboratorio. Las edades de tales muestras dan resultados concordantes de 3750 millones de años para los gneises de Amîtsoq. Sin embargo, minerales como la biotita (silicato hidratado de magnesio, hierro, aluminio y potasio) y la hornblenda (silicato hidratado de aluminio, calcio, magnesio y hierro con una pequeña proporción de potasio), extraídos de estas rocas, dan edades de unos 2600 millones de años y algunos proporcionan valores muy bajos, del orden de los 1600 millones. Se interpreta que estas edades corresponden a períodos durante los cuales los gneises de Amîtsoq sufrieron un fuerte calentamiento.

Pero, ¿por qué las muestras de roca total tienen que dar edades que difieren de las correspondientes a muestras minerales de la misma roca? Esta aparente paradoja ha hecho posible la separación de la compleja secuencia de acontecimientos que han ocurrido en un determinado terreno metamórfico. Considérese el método de roca total para el ru-

bidio-estroncio que recurre a la desintegración del rubidio 87 en estroncio 87. El rubidio es un elemento raro que sustituye fácilmente a su cercano pariente químico, el potasio, de suerte que todos los minerales que contienen a este último poseen trazas del primero, aunque, a menudo, en proporciones inferiores a unas pocas partes por millón. De hecho, todo el rubidio de la tierra se encuentra en los minerales que contienen potasio, porque no existe cantidad suficiente como para que se puedan formar los minerales propios de rubidio.

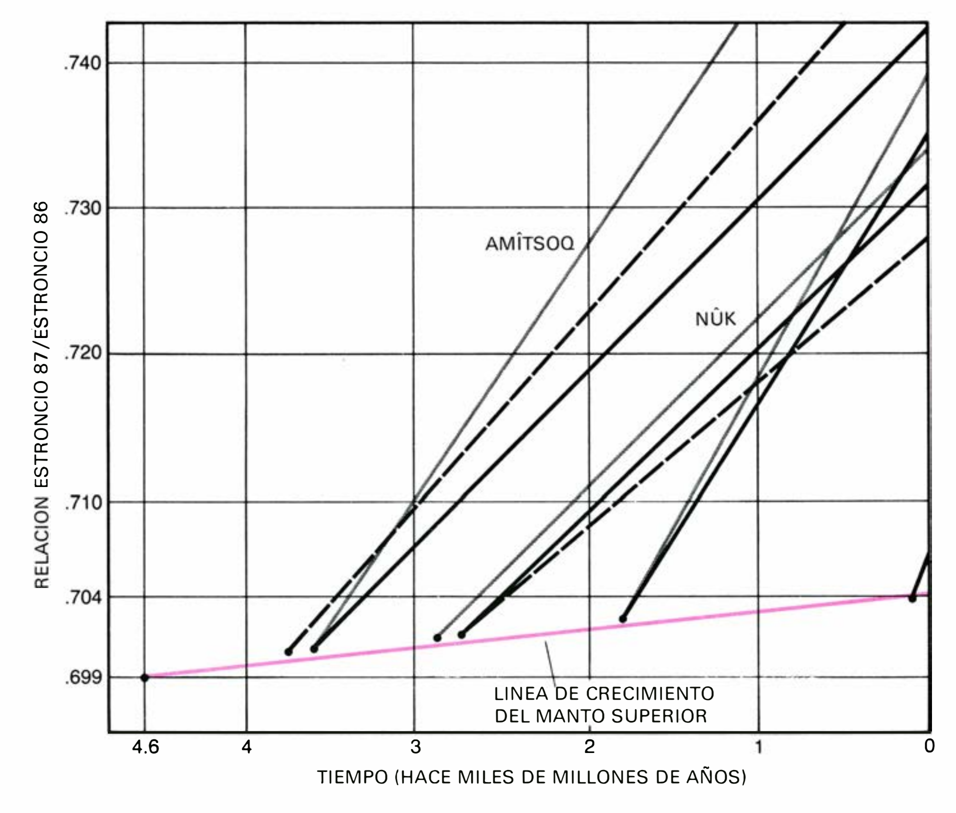
En el transcurso del tiempo, el estroncio 87 radiogénico se va introduciendo en los sitios adecuados de la red cristalina del mineral, debido a la desintegración del rubidio 87. Químicamente, el estroncio y el rubidio son del todo diferentes, pues sus iones tienen una carga y un radio distintos; así, el estroncio 87 radiogénico presenta fenómenos de difusión externa, en un mineral como la biotita, a bajas temperaturas, del orden de 200-300 °C. Sin embargo, su recorrido no suele ser muy grande, ya que es capturado por los granos circundantes de plagioclasa (silicato de calcio, sodio y aluminio) en cuya red cristalina el estroncio puede sustituir fácilmente al calcio, que es un elemento similar a él. El feldespato plagioclasa es otro constituyente frecuente en muchas rocas. Por ello, las muestras que pesan varios kilos y contienen millares de granos minerales de biotita y plagioclasa, junto con otros que liberan y captan estroncio, pueden permanecer como sistemas cerrados en relación con el estroncio 87, incluso durante una etapa de fuerte calentamiento. Es obvio que la roca debe comportarse igualmente como sistema cerrado frente al rubidio. Los mismos principios básicos pueden aplicarse a los métodos basados en la desintegración del uranio en plomo.

Hay más sobre las rocas de Groenlandia. McGregor encontró pronto pruebas de que los gneises de Amîtsoq no eran las rocas más antiguas del mundo. Igual que otros muchos gneises graníticos, contienen trozos fragmentados de rocas más antiguas en las cuales, a pesar de estar fuertemente recristalizadas, puede observarse un claro origen volcánico y sedimentario; después de haber sido depositadas, fueron enterradas hasta una profundidad de varios kilómetros antes de que los precursores ígneos de los gneises de Amîtsoq quedaran intrusos en ellas. No es fácil datar las inclusiones anteriores a los gneises de Amîtsoq, por lo que no sabemos con certeza en cuántos años son más antiguas las intrusiones que esos gneises.

Llegamos así a una de las etapas más interesantes en la localización de las rocas más antiguas de Groenlandia occidental. En 1971, mientras McGregor y el autor estaban recogiendo rocas en la zona de Godthaab, se presentó una buena oportunidad para visitar una región montañosa lejana, llamada Isua (situada a unos 100 km al nordeste del lugar donde trabajábamos), en el mismo borde del gran inlandsis. Por entonces, la compañía minera danesa Kryolitsebs-Kabet Øresund A/S comenzaba a explorar el enorme yacimiento de hierro de Isua, el cual aflora a una altura de 1400 m y se halla parcialmente cubierto por el hielo continental.

El yacimiento mineral había sido descubierto hacía poco durante una investigación magnética aérea, y los geólogos de la compañía habían realizado ya un mapa geológico provisional de la zona. El yacimiento constituía una pequeña parte de un arco ovalado incompleto, con un diámetro variable entre 12 y 25 km, e integrado por una serie, de 3000 m de espesor, constituida por rocas sedimentarias y volcánicas diversamente deformadas y de elevado metamorfismo. Era evidente que se trataba de rocas supracorticales, es decir, depositadas en la superficie, completamente rodeadas por gneises graníticos típicos, cortados verticalmente por numerosos diques de lava solidificada que, a su vez, cortaban a las rocas supracorticales.

McGregor y el autor sospecharon en seguida que los gneises y los diques eran los equivalentes menos deformados y menos metamórficos de los gneises de Amîtsoq y de los diques de Ameralik pertenecientes a la región de Godthabb. En este desértico altiplano ártico, las rocas se hallaban al descubierto, y, cizalladas y deformadas, las zonas de contacto entre los gneises y los materiales supracorticales. No había señales evidentes de que las rocas supracorticales fueran más antiguas que los gneises. En cualquier caso, nuestra impresión inmediata fue que los materiales de Isua eran equivalentes a los de Godthaab, y en una situación mucho más clara. El tiempo se encargaría de darnos la razón. Cuando R. K. O'Nions, Pankhurst y el autor dataron en Oxford los gneises y rocas supracorticales, mediante los métodos del rubidio-estroncio y del uranio-plomo, todos ellos mostraron edades cercanas a los 3800 millones de años. McGregor y el autor habían estado recorriendo, pues, una corteza continental permanente con todas sus manifestaciones ígneas, sedimentarias y metamórficas



LINEAS DE CRECIMIENTO para la relación estroncio 87/estroncio 86 de diversos gneises graníticos de Groenlandia *(líneas grises)*, América del Norte y del Sur *(líneas negras)* y Africa y escudo rodesiano *(líneas de trazos)*. La pendiente de cada una de ellas es proporcional a la relación rubidio/estroncio de cada muestra. Puesto que todas las relaciones iniciales estroncio 87/estroncio 86 convergen cerca de la línea de crecimiento correspondiente al manto superior, queda claro que los gneises más modernos de cada zona no se formaron por removilización de la corteza continental antigua. La línea más corta de la derecha muestra la relación inicial y la curva de crecimiento para el batolito granodiorítico de la costa de Chile, cuya edad no supera, en absoluto, los 100 millones de años.

producidas hace unos 3800 millones de años, y que, desde entonces, apenas si habían sido alteradas por ninguna convulsión geológica importante. Como resultado de esta experiencia, llegué a considerar la permanencia esencial de los continentes y su indestructibilidad como uno de los fenómenos geológicos fundamentales.

La geología de la región de Isua ha sido detenidamente estudiada por otros investigadores, quienes consideran que las rocas supracorticales son más antiguas que los materiales ígneos precursores de los gneises. Sin embargo, la corteza original sobre la que se formaron las rocas supracorticales no se ha encontrado y es posible que no sea ya discernible. Cabe pensar que los materiales supracorticales de Isua sean los equivalentes geológicos de las inclusiones antes citadas de edad pre-Amîtsoq, encontradas dentro de las series gneísicas de este nombre en la región de Godthaab.

Todas las rocas que forman el complejo de Isua son características de la asociación entre cinturones de rocas verdes y terrenos de gneises graníticos. Nuestras dataciones de las rocas supracorticales y de los gneises concuerdan adecuadamente, dentro de los márgenes de error analíticos, que, para las edades que estamos manejando, están comprendidos entre 50 y 100 millones de años. Esto nos sugiere que la deposición de las rocas supracorticales y el subsecuente emplazamiento de los precursores ígneos de los gneises se produjeron dentro de un lapso de unas pocas decenas de millones de años, hace ya de ello 3800 millones de años.

Las características de los sedimentos existentes en Isua demuestra que el agua existió sobre la superficie de la tierra hace 3800 millones de años. ¿Hay alguna prueba que nos indique igualmente la existencia de vida? Bartholomew S. Nagy y Lois A. Nagy, de la Universidad de Arizona, han intentado encontrar compuestos biogénicos en las rocas de Isua con resultados hasta ahora negativos. Las pruebas más antiguas de actividad biológica, muy discutibles, provienen de determinados sedimentos existentes en las rocas verdes de la zona de Barbeton Mountain Land (Africa sudoriental), los cuales pueden haber sido depositados hace más de tres mil millones de años.

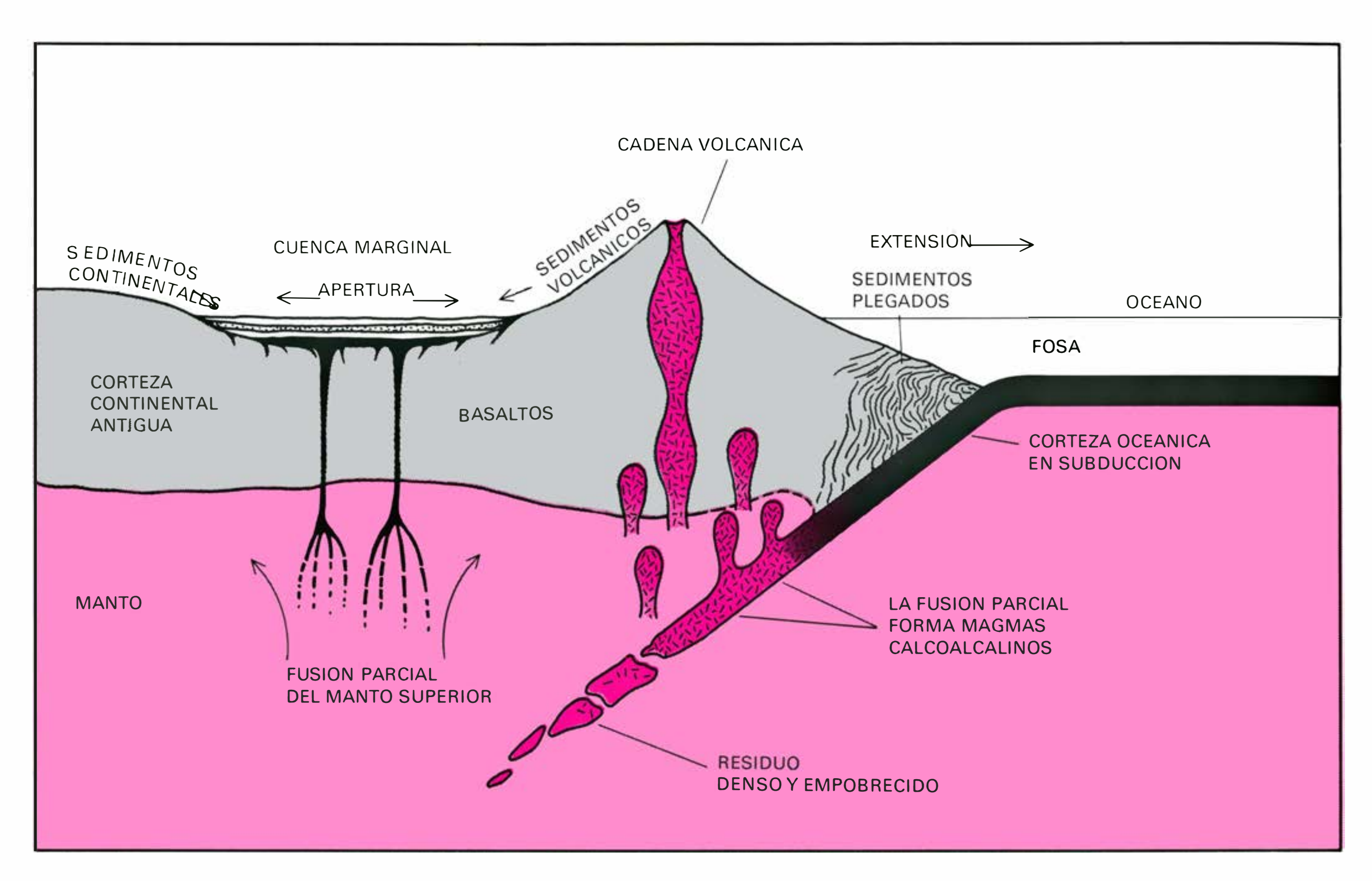
A lo largo del último bienio, se han descubierto otras rocas muy antiguas. R. W. Hurst, de la Universidad de California, en Santa Bárbara, y G. W. Wetherill, de la Universidad de California, en Los Angeles, en colaboración con Kenneth Collerson, de la Memorial University de Newfoundland, y David Bridgwater, del Servicio Geológico de Groenlandia, han dado cuenta de la existencia de rocas de 3600 millones de años en los alrededores de la Bahía de Saglek, perteneciente a la costa canadiense de la península del Labrador. Esta zona estaba unida a la de Godthaab, en Groenlandia occidental, antes de que esta última y Canadá se separaran debido a la apertura del Estrecho de Davis, hace unos 60 millones de años. P. N. Taylor, de Oxford, cita gneises del norte de Noruega con una edad de 3500 millones de años. Martha Hickmann, de la Universidad de Leeds, e igualmente C. J. Hawkesworth, O'Nions, J. F. Wilson y el autor demostraron que una parte del escudo antiguo de Rodesia tiene unos 3600 millones de años, a pesar de que su mayor parte probablemente se remonte sólo a 2700-2800 millones de años. Samuel S. Goldich, de la Northern Illinois University, y Carl E. Hedge, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, han avanzado una edad provisional, sujeta todavía a discusión, de unos 3600 millones de años para los gneises del valle del río Minnesota, al sur del estado del mismo nombre. Se dice que pronto se darán a conocer otras zonas con edades comprendidas entre 3500 y 3800 millones de años. Todo ello demuestra que sólo al cabo de unos 800 millones de años desde la formación de la tierra existía ya una corteza continental típica y que el núcleo, manto y corteza de nuestro planeta estaban igualmente diferenciados. Sin embargo, no existe ninguna prueba positiva de que alguna de estas rocas tan antiguas represente la corteza más primitiva.

El autor recela de la probabilidad de descubrir rocas aún más antiguas, cubriendo así el vacío existente entre los 3800 y los 4600 millones de años. Si una parte substancial del calor generado por la acreción original de la tierra se hubiera disipado en el espacio de manera rápida y eficiente, habría sido posible, en principio, que el núcleo, el manto y algún tipo de corteza se hubieran segregado 100 o 200 millones de años después de la acreción. De no ser así, la masa de acreción de la tierra podría haber permanecido en un estado demasiado turbulento, de forma que la segregación química no se hubiera producido hasta hace unos 3800-3900 millones de años.

Otra de las posibilidades existentes es que la tierra, al igual que la luna, fuera intensamente bombardeada por cuerpos celestes del tamaño de los asteroides que representarían los restos sobrantes tras la formación del sistema solar, hace unos cuatro mil millones de años. Este bombardeo pudo haber producido una alteración mecánica y térmica suficiente como para evitar la separación entre la corteza continental y el manto hasta entonces. Una vez terminado el bombardeo, los procesos de segregación química podrían haber finalizado al cabo de un período de 100 a 200 millones de años. Carecemos de los datos y conocimientos necesarios para explicar lo sucedido en este período inicial, pero no cabe duda de que la búsqueda de rocas más antiguas podría ser una línea de trabajo prometedora. No se han encontrado aún pruebas claras de impactos de meteoritos primitivos en rocas antiguas ni tampoco se ha demostrado, tal como sugieren algunos autores, que los cinturones de rocas verdes modernos sean los equivalentes terrestres de las grandes cuencas de lava de los *maria* lunares. Esta última hipótesis resulta improbable, si nos atenemos al estado actual de nuestros conocimientos, como para considerarla seriamente. Ni las relaciones geológicas y temporales dentro de los cinturones de rocas verdes, ni la sucesión y naturaleza de los tipos de rocas que en ellos existen concuerdan con esta hipótesis. Es casi seguro que los cinturones de rocas verdes se formaron por procesos originados en el interior de la tierra, y, probablemente, continúan actuando en la actualidad, según pondremos de manifiesto más adelante.

Volvamos ahora a la cuestión de si la corteza continental ha crecido a lo largo del tiempo, o de si se ha formado en una etapa inicial de la historia de la tierra (como mínimo hace 3800 millones de años) y luego removilizado por repetición de ciclos de fusión, sedimentación y metamorfismo. Puesto que la densidad de la corteza continental es relativamente baja sería imposible que un material de este tipo sufriera un empuje hacia el manto con el consiguiente reciclaje, una vez en su interior. Esto parece evidente de por sí, a pesar de que pueda sorprendernos que muchos geólogos consideren este reciclaje a través del manto como un proceso importante en la evolución de la corteza continental. La indestructibilidad e imposibilidad de subducción de esta última, una vez formada, constituye un principio fundamental de la tectónica global, y en ello ha insistido repetidas veces uno de sus pioneros, D. P. McKenzie, de la Universidad de Cambridge.

Por fortuna, disponemos hoy de métodos isotópicos para decidir si una determinada parte de la corteza continental es antigua, ha sido removilizada



LAS CUENCAS MARGINALES suelen abrirse detrás de los arcos de islas volcánicas. Junto a los arcos se produce subducción de la corteza oceánica, por debajo del borde continental, fundiéndose parte de esta última para dar una magma calcoalcalino. La mayor parte de este último se solidifica cerca de la base de la corteza continental, y algo de dicho magma es emitido por los volcanes en forma de lava. Cuando la subducción se detiene, detrás del arco volcánico se abre una cuenca, que se colmata de lavas y sedimentos. Una de las cuencas marginales que mejor se conoce en la actualidad es el complejo de Rocas Verdes; tal conjunto se encuentra localizado en el borde occidental del extremo sur de Chile

o se trata de una adición nueva a la corteza procedente del manto. Uno de estos métodos, cuya avanzadilla estuvo representada, a comienzos de la década 1960-70, por Gunter Faure y Patrick M. Hurley, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, se basa en el aumento de la relación estroncio 87/estroncio 86 a lo largo del tiempo geológico. El estroncio 87 viene producido por la desintegración radiactiva del rubidio 87, cuya vida media es de 50.000 millones de años. Por contra, el estroncio 86 no procede de ninguna desintegración radiactiva, de suerte que la cantidad que de él existe permanece constante.

El aumento de la proporción estroncio 87/estroncio 86 a lo largo de un determinado período es función directa de la relación rubidio/estroncio existente en una determinada muestra, expresándose generalmente esta proporción en forma de rubidio 87/estroncio 86 *(véase la ilustración inferior de la página 73).* En el manto superior de la tierra, la relación estroncio 87/estroncio 86 ha variado desde 0,699, valor que tenía hace 4900 millones de años (tomando como base la relación inicial conocida de los meteoritos y de la luna), a cerca de 0,704, que es el promedio para el manto superior de donde proceden las lavas basálticas emitidas en los océanos actuales. Si suponemos que el aumento desde 0,699 hasta 0,704 fue casi lineal a lo largo del tiempo geológico, podemos calcular que la relación rubidio/estroncio en el manto superior es 0,03. El promedio de la relación rubidio/estroncio para la corteza continental es aproximadamente 0,25 (aunque varía mucho según el tipo de roca y la profundidad a que se encuentra). De ahí se sigue que la relación estroncio 87/estroncio 86 debe aumentar según una proporción mucho mayor en la corteza continental que en el manto superior *(véase la ilustración superior de la página 74).*

Como ejemplo típico de la aplicación del método tenemos las rocas de Groenlandia occidental. Uno de los problemas más candentes debatidos hoy en día es saber si los gneises de Nûk, que forman gran parte de Groenlandia occidental, son gneises de Amîtsoq de 3750 millones de años de edad removilizados, o si representan nuevas y enormes adiciones a la corteza continental, ocurridas hace 2850 millones de años (edad que tienen muchas muestras de los gneises de Nûk medidas por Pankhurst y por el autor). La relación estroncio 87/estroncio 86 de los gneises de Amîtsoq, hace 3750 millones de años, era 0,701. El promedio de la relación rubidio/estroncio que en el presente guardan tales gneises es, aproximadamente, 0,3; este valor es afín al correspondiente promedio de una corteza continental normal. Se calcula que, hace 2850 millones de años, el promedio de la relación estroncio 87/estroncio 86 para los gneises de Amîtsoq era 0,715, aproximadamente *(véase la ilustración de la página 75).* Por tanto, la refusión y removilización de grandes volúmenes de gneises de Amîtsoq, hace 2850 millones de años, habrían producido los precursores ígneos de los gneises de Nûk, con una relación inicial, de un 0,715, estroncio 87/estroncio 86.

¿Qué es lo que encontramos realmente? La relación inicial estroncio 87/estroncio 86 para los gneises de Nûk tiene un valor cercano a 0,702, y es evidente que los gneises más modernos no son gneises de Amîtsoq removilizados. La mejor explicación que se puede dar de las razones iniciales de estroncio 87/estroncio 86 para los gneises de Amîtsoq y de Nûk (0,701 y 0,702 respectivamente) es que sus precursores ígneos granodiorí-

ticos y tonalíticos fueron producidos por la diferenciación química de material derivado del manto superior, a través de algún proceso de acreción continental que ocurrió hace un tiempo próximo a los valores medidos (3750 y 2850 millones de años).

Hasta ahora se han publicado suficientes datos sobre los isótopos del estroncio de rocas de Europa, Groenlandia, Africa, Norteamérica y Australia, que dan edades comprendidas entre 2600 y 2800 millones de años; ello demuestra que los gneises graníticos, los cinturones de rocas verdes y las rocas ígneas asociadas que los cortan se formaron en el transcurso de sólo unos 100 o 200 millones de años debido, sobre todo, a fusión parcial y diferenciación química del manto superior o de materiales derivados de él. La removilización de corteza continental, mucho más antigua, ha desempeñado un papel muy secundario, a pesar de que se puede detectar isotópicamente en algunas partes. Puede sacarse idénticas conclusiones a partir de datos, algo más escasos, relativos a los isótopos del plomo obtenidos para las mismas rocas.

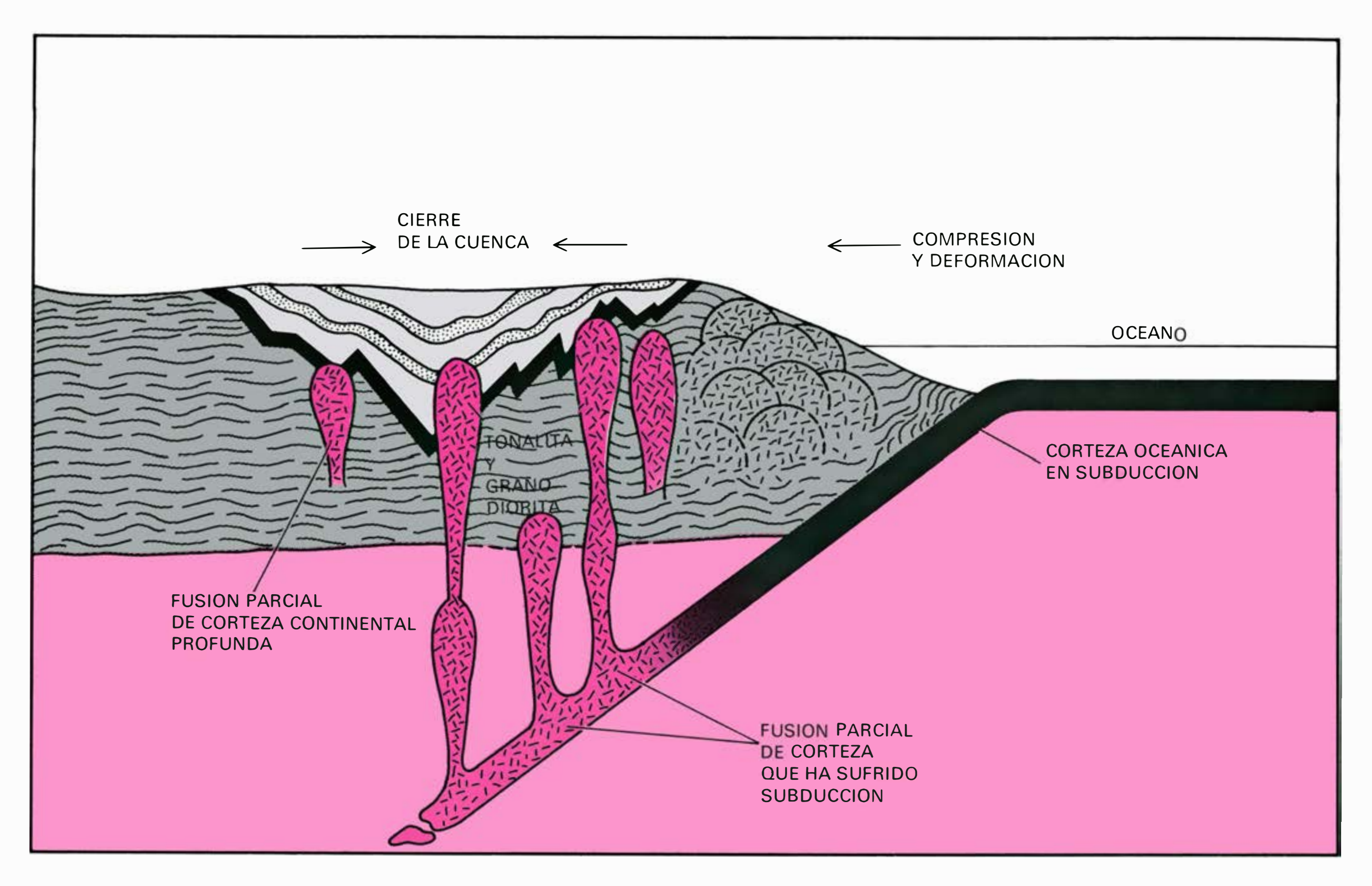
Las investigaciones sobre los isótopos de rocas con edades entre 1700 y 1900 millones de años, procedentes de Groenlandia, Norteamérica y de otros lugares, demuestran que todo el proceso se produjo nuevamente en ese tiempo. Las relaciones iniciales bajas de estroncio 87/estroncio 86 en muchas rocas de esa edad muestran que la acreción continental predominó de nuevo sobre el proceso de removilización de la corteza más antigua. Con el transcurso del tiempo, desde el remoto pasado geológico hasta la época actual, las relaciones existentes entre los isótopos del estroncio y entre los del plomo resultan más difíciles de interpretar. Lo que sí indican realmente es una tendencia cada vez mayor, por parte de la corteza continental más antigua, a contribuir a la formación del material que constituye la corteza continental más moderna, a pesar de que la acreción continental siga predominante en dondequiera que la corteza oceánica sufra subducción por debajo de un continente.

En oposición a tesis anteriores, muchos geólogos han llegado a aceptar recientemente que las rocas verdes y los gneises graníticos del Arcaico presentan innumerables semejanzas petrológicas, químicas y estructurales con las rocas encontradas en los bordes continentales en donde la corteza oceánica sufre subducción y se consume parcialmente bajo el continente suprayacente. Las zonas de este tipo reciben el nombre de bordes de placa destructivos. Concretando más, puede decirse que los gneises graníticos arcaicos se parecen de un modo muy estrecho, en cuanto a composición, a los grandes batolitos calcoalcalinos de la costa occidental de Norteamérica y de América del Sur, por citar dos ejemplos. Sin embargo, la erosión producida hasta ahora en estos batolitos no ha profundizado aún lo suficiente como para poner al descubierto regiones con gneises menos silíceos, con déficit de elementos incompatibles, que, probablemente, forman sus equivalentes infrayacentes y que, estrictamente hablando, deberían compararse con los arcaicos. De cualquier manera, hay que señalar que no sabemos realmente si los batolitos de América del Norte y del Sur se continúan en profundidad en unos gneises de la misma edad; si bien los estudios de flujo calorífico realizados en el batolito de Sierra Nevada por Arthur H. Lachenbruch, del Servicio Geológico de EE. UU., demostraron que existe una disminución de la producción de calor en sentido descendente. Ello se debe a un marcado descenso en la concentración de elementos radiactivos geoquímicamente incompatibles, a medida que aumenta la profundidad. En mi opinión, y de acuerdo con lo avanzado por B. F. Windley, de la Universidad de Leicester, y Joseph V. Smith, de la Universidad de Chicago, los gneises graníticos arcaicos son los equivalentes antiguos de los modernos batolitos granodioríticos y tonalíticos, localizados a lo largo de los bordes de placa destructivos.

La química y la petrología de las lavas volcánicas de los cinturones de rocas verdes arcaicas tienen afinidades tanto con las lavas emitidas por los volcanes situados encima de las zonas de subducción (en los bordes continentales actuales o cerca de ellos), como con las producidas en las dorsales centro-oceánicas. Tanto los arcos de islas volcánicos (p. ej. las islas del Japón), como los volcanes de los bordes continentales, se encuentran en los bordes de placa destructivos y representan un ambiente geológico y químico notablemente diferente del que existe en las dorsales centro-oceánicas, las cuales forman bordes de placa constructivos. Con todo, las rocas volcánicas de los cinturones de rocas verdes presentan una composición afín a ambos. Para explicar esta aparente contradicción, John Tarney, de la Universidad de Birmingham, e Ian W. D. Dalziel y M. J. de Wit, de la Universidad de Columbia, así como Kewin C. Burke, John F. Dewey y W. S. F. Kidd, de la Universidad estatal de Nueva York, en Albany, han propuesto recientemente que los cinturones de rocas verdes del Arcaico pueden fielmente compararse con las denominadas cuencas marginales que se encuentran encima de las zonas de subducción, en los bordes continentales o en sus cercanías.

Las cuencas de este tipo son verdaderos centros de expansión que pueden adelgazar, abrir e incluso romper el espesor de la corteza continental suprayacente. Nadie ha explicado a plena satisfacción la razón de su existencia, pero tal vez guarde alguna relación con el carácter episódico del proceso de subducción. Este último puede detenerse brevemente proporcionando así al manto subcontinental, situado por encima de la zona de subducción, una oportunidad para establecer un régimen de convección que luego produce la apertura de la corteza suprayacente. Como caso extremo, puede ocurrir que una porción pequeña de continente se separe del resto creando entre medio un "microocéano". Al cabo de unos cuantos millones de años, pocos, la subducción puede reanudarse tal como antes, y producir de nuevo un cierre de la cuenca marginal con considerable deformación y trastorno de las rocas volcánicas y sedimentarias de la cuenca marginal y de las rocas corticales circundantes.

¿Adónde nos conduce todo lo anterior? El acontecimiento más primitivo, formador de un gran continente en la superficie de la tierra, y del cual tenemos pruebas, ocurrió hace unos 3800 millones de años. Sin embargo, no existe ningún fundamento para pensar que necesariamente tuviera que ser el primer acontecimiento de este tipo y tampoco hay ninguna prueba de que las rocas de esa edad representen la corteza continental más primitiva de todas. La mayoría de los tipos de rocas tienen un parecido muy exacto a los que se encuentran en épocas geológicas posteriores y, por tanto, es probable que se originaran mediante procesos similares. No se conoce todavía la extensión de superficie terrestre ocupada por la corteza continental durante el intervalo comprendido entre 3500 y 3800 millones de años del tiempo geológico, pero sospecho que no era superior al 5-10 por ciento del área ocupada por los continentes actuales. El espesor medio de esta corteza continental antigua pudo haber tenido un valor cercano a los 20-30 km y no era muy distinto del que presenta la actual, manifestándose en aquel entonces tan rígida y resistente como la que tenemos



SI LA SUBDUCCION SE REANUDA, la cuenca marginal se volverá a cerrar con la consiguiente compresión y deformación intensas que afectarán tanto a la corteza continental antigua como a la de nueva formación. Esta última queda químicamente diferenciada y estratificada según su composición, restando, en el proceso, firmemente soldada a la corteza antigua. Más hacia el interior del continente, la fusión parcial de la corteza oceánica que ha sufrido subducción produce nuevos magmas que invaden las rocas deformadas de la cuenca marginal cerrada.

hoy en día. Una prueba de ello es la presencia de numerosas fisuras verticales rellenas de lava basáltica; por ejemplo, los diques de Ameralik, que fueron inyectados en un tiempo muy anterior a los últimos 2900 millones de años en una corteza continental fría y frágil como los gneises de Amîtsoq.

El siguiente suceso de importancia en la formación de continentes ocurrió hace 2900-2600 millones de años, y es posible que fuera la causa de la formación de una corteza continental equivalente en extensión a un 50-60 por ciento de la actual, siendo el espesor medio de la corteza virtualmente el mismo al que tenemos hoy en día. Cada vez hay mayor número de pruebas, proporcionadas por las mediciones de edad absoluta, que demuestran la existencia, a escala mundial, de episodios similares formadores de continentes, y que ocurrieron hace 1900-1700 millones de años, aproximadamente; se produjeron fenómenos parecidos entre los 1100 y 900 millones de años y, más recientemente, a lo largo de los últimos 600 millones de años. El último acontecimiento importante coincide con el período en que la tectónica de placas, operando igual que hoy en día, produjo la ruptura y dispersión de los continentes, es decir, la deriva continental. Anteriormente, cabe pensar que sólo hubiera existido un único supercontinente inmenso denominado Pangea, o bien dos supercontinentes: Laurasia, al norte, y Gondwana, al sur. Se dispone de datos geológicos procedentes de determinadas estructuras lineales antiguas, relacionadas con las raíces de las cordilleras de montañas, que demuestran lo siguiente: distintas partes del supercontinente sufrieron movimientos diferenciales recíprocos de unos pocos centenares de kilómetros. Sin embargo, mientras este supercontinente perfectamente coherente se pudiera mover en relación con el fondo oceánico adyacente, este último podría haber sufrido una subducción, fusión parcial y diferenciación química, con objeto de producir corteza continental típica en el borde frontal del protocontinente; tal proceso resulta análogo a la acreción que tiene lugar hoy en día en los arcos de islas y en los márgenes de los continentes.

En discrepancia con otros geólogos, creo que tanto la corteza continental como la oceánica han sido lo suficientemente rígidas y han tenido un espesor adecuado como para que los procesos de la tectónica de placas de uno u otro tipo hayan ido desarrollándose desde hace 3800 millones de años hasta la actualidad. Ello implica que el proceso formador de continentes antiguos no fue muy distinto del que opera hoy en día. Existen pruebas sólidas de que las provincias geológicas antiguas existentes en las zonas de escudos precámbricos no están dispuestas al azar en el espacio, sino que, a medida que pasamos de unas a otras, vamos encontrando gradualmente las más modernas, tal como cabría esperar de la hipótesis de la acreción continental progresiva. La disposición espacial de las provincias geológicas antiguas es uno de los principales campos de estudio de la investigación actual.

Se desconoce la razón de la aparente naturaleza episódica del proceso formador de continentes. Quizá se trate solamente de una ilusión de la que es culpable la falta de datos; aunque, en el fondo, no creo que sea así. Los mismos agrupamientos de edades se repiten en todos los continentes y, durante esos períodos de tiempo, la tierra parece volcarse en procesos violentos para luego sumergir-

se en una inactividad relativa, almacenando gradualmente fuerzas internas para la siguiente fase de actividad. Sospecho que todo ello está relacionado con una acumulación y disipación periódica del calor generado en el interior de la tierra por la desintegración radiactiva y por los cambios periódicos en la disposición de las corrientes de convección existentes en el manto (tal como han sugerido McKenzie y S. K. Runcorn, este último de la Universidad de Newcastle). Una vez conocidos todos los parámetros físicos, pueden ser introducidos en las ecuaciones de la nueva rama de las matemáticas denominada teoría de la catástrofe, que describe y predice los fenómenos episódicos y discontinuos, es decir, fenómenos que se producen de forma espasmódica.

Resumiendo, considero que los principales factores que han gobernado la evolución de la corteza continental son los siguientes. En primer lugar, la irreversible diferenciación química del manto superior, que empezó como mínimo hace 3800 millones de años, ha producido un predominio de la acreción continental sobre el reciclaje y removilización de los continentes. Los antiguos procesos de acreción fueron probablemente análogos a sus correspondientes actuales e implicaron algún tipo de mecanismo parecido al de la tectónica de placas y fusión parcial del manto superior, a menudo con adiciones de corteza oceánica afectada por la subducción. La corteza continental más primitiva, en el caso de que tuviera una edad superior a los 3800 millones de años, se formó, tal vez, de la misma manera. Es muy fácil imaginar un tipo de tectónica de placas en la que sólo intervenga corteza basáltica primordial, pero de todas formas el cálculo demuestra que el manto superior es lo suficientemente grande como para haber producido toda la corteza continental durante la historia geológica de la tierra, sin que él mismo haya sufrido ningún cambio global detectable en su composición química.

En segundo lugar, las dataciones de edad absoluta demuestran con nitidez la escala temporal relativamente corta de un episodio de acreción continental. El inmenso volumen de material ígneo, volcánico y plutónico, adicionado, se diferencia del manto superior, o de corteza oceánica que ha sufrido subducción, a lo largo de un intervalo de 200 millones de años como máximo. Al mismo tiempo, el material ígneo de nueva formación sufre una diferenciación química y recristalización metamórfica en las partes profundas de la corteza, lo cual provoca un gradiente descendente desde las rocas ígneas ordinarias hasta los gneises metamórficos (éstos se encuentran progresivamente empobrecidos de elementos incompatibles). Según este punto de vista, la distinción, basada en el tiempo, entre lo ígneo y lo metamórfico, empieza a dejar de funcionar debido a la gradación continua existente entre los dos tipos de rocas. Los gneises localizados en los segmentos continentales que han experimentado nuevas acreciones son los equivalentes más profundos, y de mayor presión y temperatura, de las rocas ígneas del nivel superior.

En tercer lugar, debemos considerar la permanencia de la corteza continental en razón de su baja densidad relativa. Las rocas continentales ígneas, sedimentarias y metamórficas no pueden ser empujadas de nuevo hacia las zonas de subducción del manto superior y hasta una profundidad suficientemente grande, para que formen cantidades importantes de nuevas rocas ígneas, por fusión. En lugar de ello, las rocas continentales sufren una intensa deformación y empuje hacia arriba a favor de grandes fallas cabalgantes, localizadas en las cordilleras marginales de los continentes. Cuando disminuye la presión, se produce un considerable levantamiento isostático, de millares de metros, de todo el segmento cortical, como ocurre con un tapón de corcho mantenido bajo el agua que salta hacia arriba al desaparecer la fuerza ejercida sobre él.

No todos los geólogos comparten los criterios mantenidos en este artículo. Personalmente, reconozco el factor condicionante de mi propia experiencia en lo que se refiere a datación de rocas antiguas mediante isótopos y, sobre todo, la poderosa influencia ejercida por los trabajos de muchos investigadores precedentes, entre los cuales me gustaría destacar a Hurley, A. E. Ringwood, de la Australian National University y W. S. Fyfe, de la Universidad de Western, Ontario. Me doy perfecta cuenta de que la distinción entre acontecimientos geológicos arcaicos y recientes se va haciendo cada vez más borrosa a lo largo del artículo. La razón de ello estriba en que las semejanzas existentes a lo largo de los últimos 3800 millones de años son mayores que las diferencias y que, de todos modos, sería poco realista atenerse de manera demasiado rígida a la doctrina uniformitarista de Hutton. Si llegan a descubrirse nuevas pruebas de la existencia de unos cuantos episodios de acreción continental, importantes y bien diferenciados, los geólogos deberían pensar seriamente en modificar la doctrina del uniformitarismo episódico.

Peces luminosos destellantes

Iluminan el agua por medio de un gran órgano situado debajo de cada ojo, en cuyo interior habitan ciertas bacterias. Utilizan la luz para ver, comunicarse, atraer las presas y confundir a sus depredadores

John E. McCosker

La producción y utilización de la luz por los animales, por los peces en particular, ha venido interesando a lo largo de los siglos a bioquímicos, etólogos y observadores de la naturaleza. Los peces luminosos destellantes de la familia Anomalópidos son quizá los que ofrecen el ejemplo más espectacular de este fenómeno de bioluminiscencia. Mientras que la mayoría de los animales bioluminiscentes suelen utilizar la luz con un solo propósito –comunicarse, atraer las presas, escapar de sus depredadores o mejorar la visibilidad–, los peces luminosos destellantes utilizan la suya para todos estos fines.

El nombre Anomalópidos deriva del griego, y significa "ojos anormales". Describe de manera apropiada la característica de las cuatro especies de la familia: *Anomalops katoptron, Photoblepharon palpebratus, Kryptophanaron alfredi* y *Kryptophanaron harveyi.* En todas ellas existe, debajo de cada ojo, un órgano especializado, repleto de bacterias productoras de luz, las cuales generan, en conjunto, un resplandor comparable al de un destello fotográfico débil. Los peces pueden velar la luz por diversos medios, produciéndose un verdadero efecto de encendido y apagado.

Estas criaturas luminosas han estado rodeadas por el misterio desde que, en el siglo XVIII, el naturalista alemán Peter Boddaert observara el primer ejemplar. Se sabía tan poco de ellas porque se había capturado contados ejemplares, debido a su talla mínima y a su tendencia a mostrarse activos sólo de noche y en aguas profundas. En los últimos años, al disponerse de más datos, se ha podido avanzar en su conocimiento. En el Steinhart Aquarium de San Francisco (una división de la Academia de Ciencias de California) tuve la fortuna de poder mantener vivos a varios de ellos. Así, con mis colegas, pude observar y comprobar experimentalmente su comportamiento. Recientes adelantos en el campo de la bacteriología, investigaciones subacuáticas y en el transvase y mantenimiento de peces vivos han conducido a una síntesis de las distintas técnicas que ha dado por resultado un rápido aumento del volumen de información sobre los peces luminosos destellantes. La denominación "peces luminosos destellantes" prosperó a partir de un artículo aparecido en *Science,* en 1975, titulado: "Light for All Reasons: Versatility in the Behavioral Repertoire of the Flashlight Fish". James G. Morin, de la Universidad de California, en Los Angeles, y los cinco coautores terminan así el artículo en cuestión: "Por tanto, el repertorio del comportamiento bioluminiscente de *Photoblepharon* es extenso y variado. Comprende muchas actividades diferentes, ofensivas, defensivas y comunicativas; lo que llama particularmente la atención es que, en ello, esté involucrado un solo tipo de órgano luminoso. La multiplicidad de funciones sugiere que el órgano es comparable a un flash, cuyo propietario puede utilizarlo de manera facultativa".

Mi primer encuentro con los peces destellantes fue fortuito, a raíz de una expedición organizada por la Academia de Ciencias de California, durante el bienio 1974-1975, a la isla Gran Comore, en el Océano Indico, para capturar un pez raro, conocido por celacanto. A pesar de que me especialicé, en la Scripps Institution of Oceanography, en la rama de ictiología, nunca había visto ningún anomalópido vivo o en formol en la gran colección de peces de la Scripps Institution ni en las vastas colecciones de la Standford University y de la Academia de Ciencias de California. Mis únicos guías en el mundo de los peces, raros y fuertemente bioluminiscentes, de los géneros *Photoblepharon* y *Anomalops,* fueron las publicaciones de E. Newton Harvey, de la Universidad de Princeton, una autoridad en bioluminiscencia; de ahí que me sintiera intrigado cuando Francis Debuissy, un veterinario y buceador francés afincado en Gran Comore, empezó a describirme un pez luminoso al que los pocos buceadores franceses que lo habían visto llamaban *le petit Peugeot.* Eran éstos los hombres intrépidos que se aventuraban a bucear en las aguas tropicales de las Comores durante la fase de luna nueva. Los peces se dejaban ver únicamente en las noches más cerradas y parecían abundar solamente a profundidades superiores a los 30 metros, donde nadaban sobre los arrecifes con sus órganos luminosos encendidos, semejando pequeños automóviles oscuros desplazándose por una carretera a media noche.

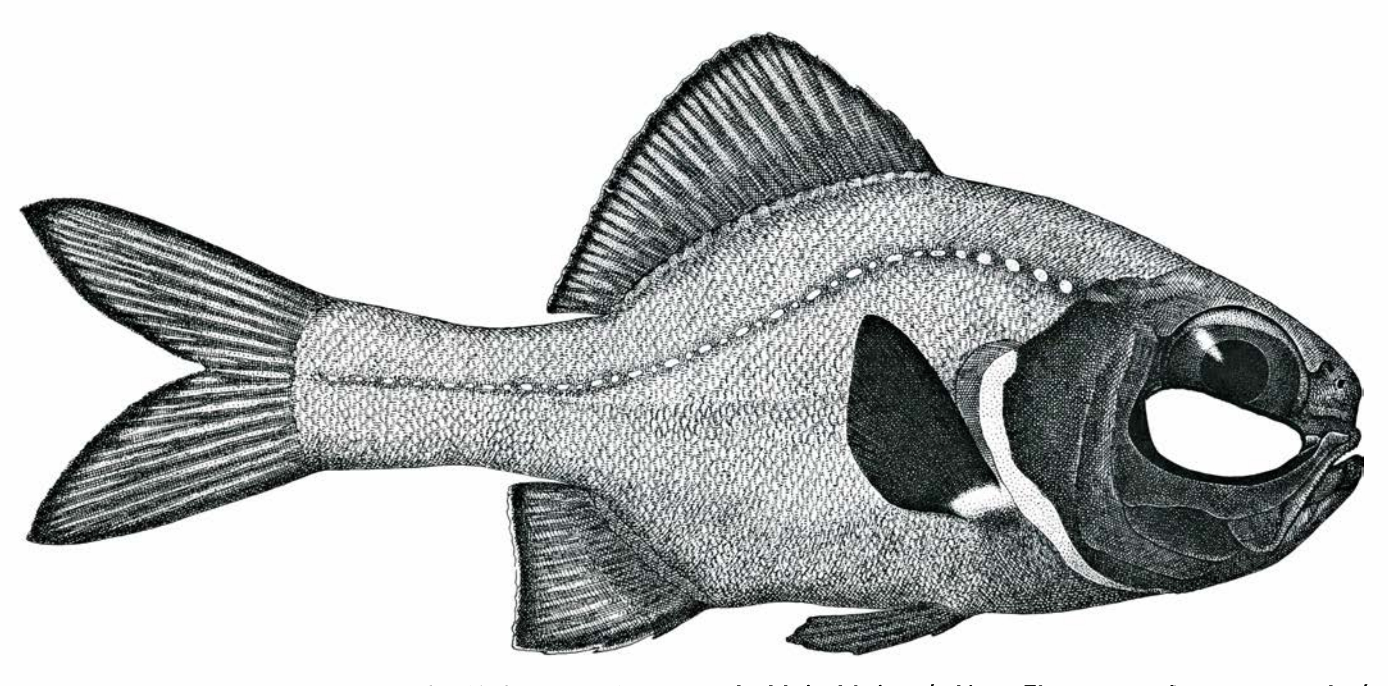
Debuissy decía contrariado que, verlos, sí los había visto, pero que no había podido capturar ninguno porque el haz luminoso de su linterna resultaba demasiado débil para inmovilizarlos. (Los peces luminosos, al igual que otros muchos animales, tienden a quedarse quietos frente a una luz brillante.) El estaba seguro de que nuestras luces de inmersión, más modernas y más brillantes, podían conseguirlo, en particular cuando la luna se encontrase en su fase oscura. Las noches siguientes le dieron la razón, y yo volví a San Francisco, en marzo de 1975, llevándome ejemplares de *Photoblepharon,* vivos unos y en formol otros, conmigo.

Además de estos trabajos efectuados

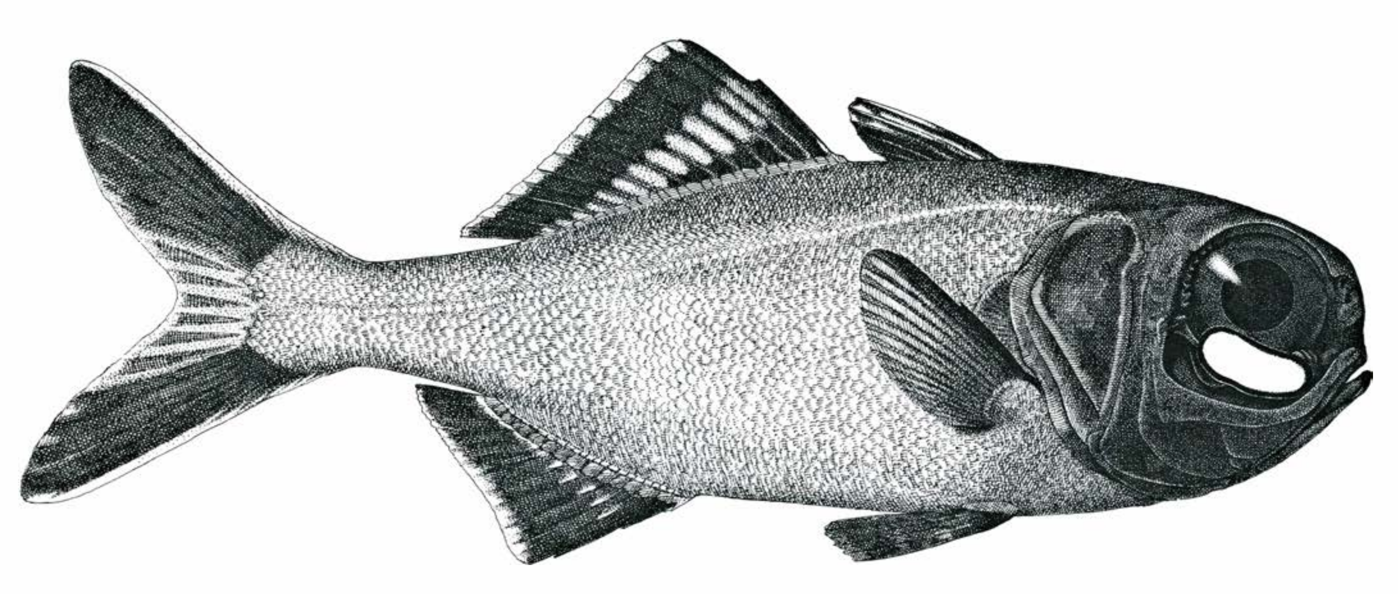
sólo o en colaboración, el número de investigaciones sobre los peces luminosos destellantes aumentó significativamente a partir del conflicto árabe-israelí de 1967. La relación entre ambos hechos, aparentemente inconexos, me fue explicada por Morin, quien, a su vez, la obtuvo de un ictiólogo israelí con el cual había estudiado la población de peces luminosos destellantes del Mar Rojo, en el Laboratorio de Biología Marina "Heinz Steitnitz", situado en el golfo de Eilat. Durante una de las patrullas nocturnas de rastreo a lo largo de la costa de la península del Sinaí, después de la guerra de los Seis Días, los soldados israelíes observaron tras los arrecifes de coral una masa que emitía un débil resplandor verdoso. Los soldados creyeron, naturalmente, que se trataba de un comando de hombres rana enemigos y lanzaron cargas explosivas sobre la masa resplandeciente. Su sorpresa fue grande al encontrar la playa cubierta de pececillos de color oscuro, en cuyas cabezas continuaban brillando un par de manchas verdes.

A partir de esa fecha, han vuelto al golfo de Eilat varios grupos de investigadores americanos e israelíes para estudiar ese tipo de peces poco conocido. Han descubierto que, durante las horas de luz, los peces luminosos destellantes habitan en las grutas oscuras y en los escondrijos de las profundidades del arrecife. En las noches en que la luna no brilla, o brilla poco, salen de sus refugios en solitario o en pequeñas formaciones, rebuscando por el fondo y en los bordes del arrecife crustáceos y otros animales planctónicos. En el Mar Rojo, se desplazan hacia las aguas costeras en grupos compactos que adquieren la apariencia de un organismo verdoso de gran tamaño.

El primero que dio nombre científico a los peces luminosos destellantes fue Boddaert. En 1781, denominó a un ejemplar procedente de Indonesia *Sparus*



PEZ DESTELLANTE de la especie *Photoblepharon palpebratus*, aumentado casi al doble de su tamaño adulto. El órgano luminoso situado debajo del ojo está abierto. El pez es pequeño y oscuro, y, además, se esconde, viviendo en aguas profundas dentro de grutas y escondrijos.



ANOMALOPS KATOPTRON, cuyas diferencias anatómicas respecto de *Photoblepharon palpebratus* aparecen con claridad. Se ha mantenido la misma escala anterior. Los ejemplares de *Anomalops* fueron capturados en Indonesia, en las islas Salomón y en aguas japonesas.



PHOTOBLEPHARON PALPEBRATUS fotografiado en el Oceano Indico, de noche y a una profundidad de unos 30 m. El pez se muestra activo sólo durante las noches oscuras y en aguas profundas, por lo que ha resultado difícil obtener información precisa sobre sus costumbres.



ANOMALOPS KATOPTRON es la otra especie de pez destellante que los biólogos han podido observar en vivo. Difiere de *Photoblepharon* en el mecanismo de oscurecimiento de su luz: en vez de correr una cortina, hace girar hacia abajo su órgano luminoso introduciéndolo en una bolsa. De hábitos gregarios, forma cardúmenes, que, de noche, suben a la superficie para alimentarse.



PEZ PINOCHO (CLEIDOPUS GLORIAMARIS), conocido también por pez estrella. No es un pez luminoso destellante, pero posee un órgano luminoso parecido. El órgano es fijo. Su parte superior anaranjada actúa como un filtro que transforma la luz azul producida por el órgano en azulverdosa. El órgano luminoso está colonizado por un clon diferente de bacterias, como en los destellantes.

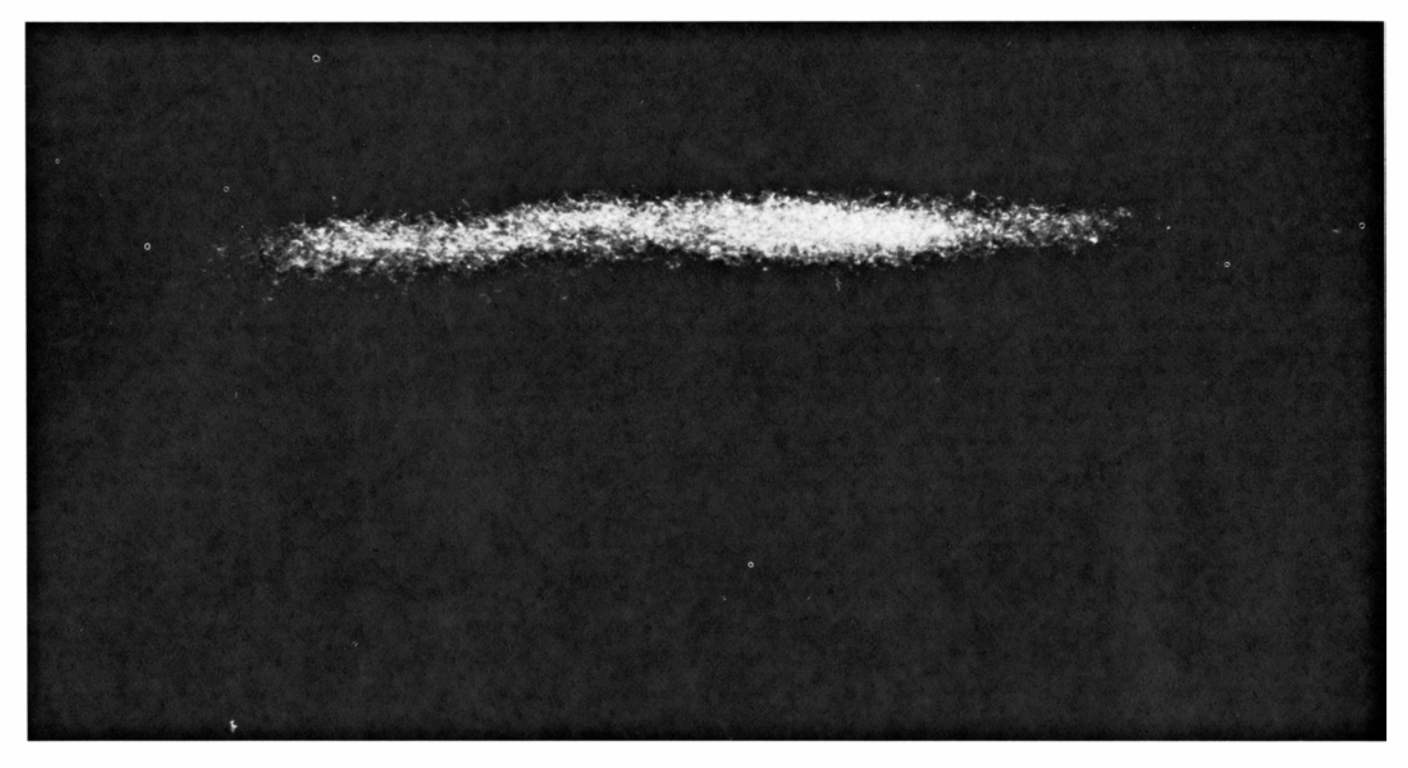
palpebratus, que significa "pargo con párpados". Boddaert supuso que la función de aquel órgano, grande e insólito, situado debajo de los ojos, era protegerlos de los daños que podrían causarles las ramas de los corales entre los que estos peces vivían. En 1803, el naturalista francés conde Bernhard Lacépède sugirió que el tal órgano serviría para defender el tejido sensible contra los rayos solares.

Hubo que esperar hasta 1900 para que el ictiólogo holandés A. G. Vorderman publicase sus observaciones acerca de la luz producida por los peces vivos. Los taxonomistas, con poco conocimiento de estas criaturas tan curiosas, se aprestaron a clasificarlos en seguida en géneros y familias distintos. Finalmente, el biólogo holandés Max Weber estableció el género *Photoblepharon* (que significa párpado luminoso), al cual pertenece hoy una especie de peces luminosos destellantes. El descubrimiento reciente de una población de esta especie en el Mar Rojo, y de su presencia en el Oceano Indico, pone de manifiesto que su mapa de distribución abarca desde Indonesia hasta el Mar Rojo. Cabe esperar que una mayor vigilancia por parte de los submarinistas nocturnos en zonas intermedias confirme su amplia distribución.

Una segunda especie, procedente del mar de las Célebes, fue denominada por el ictiólogo alemán Pieter Bleeker, en 1856, *Heterophthalmus* (que significa ojos diferentes) *katoptron* (que significa espejo, refiriéndose presumiblemente al órgano luminoso). Posteriormente, la especie pasó a engrosar el nuevo género *Anomalops,* por cuanto *Heterophthalmus* había sido adoptado ya como nombre genérico para un escarabajo. Esta especie, gregaria, se comporta de una manera totalmente diferente de *Photoblepharon,* en el sentido de que se reúne en grupos de no menos de 200 individuos, alimentándose del plancton próximo a la superficie durante la noche. *Anomalops,* al igual que *Photoblepharon,* permanece escondido durante las horas de luz solar, o durante las noches en que brilla la luna; se ignora en qué lugares se refugian en esos períodos. La especie ha sido recolectada en sitios diferentes de Indonesia y de las islas Salomón, y se han capturado asimismo cinco ejemplares en aguas del mar del Japón.

Resulta un tanto sorprendente que hayan aparecido dos especies de anomalópidos en el Nuevo Mundo, representada cada una por un solo ejemplar. Ulric Dahlgren, de la Universidad de Princeton, descubrió una forma del Caribe, denominada *Kryptophanaron* (que significa linterna oculta) *alfredi* (en honor de

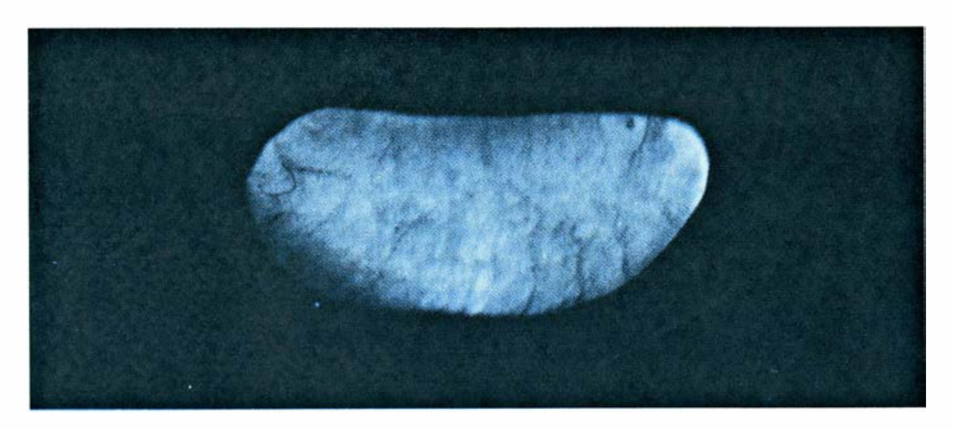
Alfred Mitchell), en 1907, flotando en aguas superficiales frente a las costas de Jamaica. Los investigadores americanos Charles F. Silvester y Henry W. Fowler describieron el ejemplar, que posteriormente extraviaron, como especie perteneciente a un género nuevo. No se ha pescado ningún otro ejemplar de *K. alfredi.* En 1972, fue capturado por un barco camaronero, en aguas relativamente poco profundas del golfo de California, un pez pequeño, de color oscuro y con una mancha brillante debajo de cada ojo. El capitán mexicano presentó el ejemplar a W. Linn Montgomery, un joven licenciado en ictiología por la Universidad de California, en Los Angeles, manifestándole que, en los 35 años que llevaba dedicado a la pesca del camarón, no había visto nunca un pez como aquél. Richard H. Rosenblatt, de la Scripps Institution, y Montgomery llegaron a la conclusión de que el ejemplar pertenecía a una especie nueva, a la que denomi-



CARDUMEN DE PECES LUMINOSOS destellantes, fotografiados en el Mar Rojo, de noche y con la única luz de sus órganos luminosos. Este cardumen de *Photoblepharon palpebratus* consta de unos 30 peces. Cada individuo apaga su luz con una determinada frecuencia, dentro de un patrón de parpadeo, deslizando una cortina cutánea sobre el órgano, muy especializado, que contiene las bacterias emisoras de luz.



FOTOGRAFIA TOMADA A LA LUZ DEL DIA del lugar del Mar Rojo en donde se obtuvo la imagen del cardumen de peces luminosos. El borde lejano del arrecife de coral (a unos 12 m de la cámara) es la zona en donde los peces se congregaron de noche para alimentarse de plancton, en aguas someras. En otras partes, *Photoblepharon* no suele hallarse con abundancia a menos de unos 30 metros de profundidad.



ORGANO LUMINOSO de un pez destellante, extirpado quirúrgicamente y fotografiado con su propia luz y a una exposición adecuada. Las bacterias contenidas en el órgano continúan emitiendo su luz, azul-verdosa, durante ocho horas o más después de habérsele extirpado el órgano. Este, que en el pez tiene la superficie interior negra, procede de un ejemplar vivo de *P. palpebratus*.

naron *Kryptophanaron harveyi* en honor de E. Newton Harvey.

Las dos formas del Nuevo Mundo son bastante parecidas, lo que sugiere la idea de que tienen un antecesor común anterior a la emersión de la América Central. Se cree que este fenómeno sucedió hace ahora de uno a tres millones de años; comportó la separación de las poblaciones acuáticas del Caribe y de la costa oriental del Pacífico, proporcionando así una base para su posterior diferenciación en especies distintas.

Cuando se considera las numerosas capturas de peces hechas por los biólogos y los pescadores profesionales en el mar del Caribe y en el golfo de California, no deja de llamar la atención el extraño fenómeno de que sólo se conozca un ejemplar de *Kryptophanaron alfredi* y otro de *K. harveyi*. La rareza de estos peces puede atribuirse al hábitat que, al parecer, prefieren: arrecifes situados a mayores profundidades que aquellas a las que habitualmente bajan los buceadores y zonas rocosas relativamente inaccesibles a la pesca con red. Podría añadir, basándome en experiencias personales, que los biólogos sensatos que efectúan inmersiones profundas en aguas tropicales, raramente las practican, y nunca les divierte llevarlas a cabo, durante las noches oscuras y con las luces de inmersión apagadas. Los anomalópidos son notables por varias razones. Sus órganos luminosos producen la que quizá sea la luz más intensa conocida, proveniente de un órgano luminiscente multicelular. El anomalópido, al parecer, emplea su luz no sólo para atraer a las presas, confundir a los depredadores y comunicarse con los demás miembros de su especie, sino también para alumbrarse y ver lo que tiene delante de sí.

La cara externa del órgano es de color crema, mientras que la superficie interior y la superior son negras (si estas superficies no fuesen negras, la luz podría deslumbrar al propio pez). Resulta fácil experimentar con el órgano luminoso, puesto que puede extraerse quirúrgicamente sin dificultad y continúa brillando durante ocho o más horas después de la extracción.

El resplandor de los órganos luminosos de *Photoblepharon* y *Anomalops* procede de las bacterias simbiontes que viven en ellos. Para las bacterias, la luz es un producto secundario del metabolismo, así como el calor es también un producto secundario del metabolismo en los animales de sangre caliente. Cantidades enormes de bacterias (unos 10 mil millones por centímetro cúbico de fluido del órgano) se encuentran reunidas dentro de compartimentos nutricios especiales, en el interior del órgano luminoso.

En las Comores, junto con mi colega Michael D. Lagios, intentamos cultivar las bacterias en diferentes medios nutritivos. Nos proponíamos devolver luego al Steinhart Aquarium las bacterias cultivadas, con las vivientes en los propios peces, de manera que, si las luces se llegaban a apagar, nos fuese posible reinfectar los órganos y encenderlas de nuevo. Abandonamos el proyecto porque nos vimos incapaces de cultivarlas. Más tarde supimos que tanto Harvey como los investigadores japoneses Yata Haneda y F. I. Tsuji habían fracasado en intentos similares. Haneda y Tsuji concluyeron que no se trataba de bacterias normales sino de organismos paracelulares procariotas (sin núcleo), a los que llamaron "bacterioides".

Kenneth Nealson, de la Scripps Institution, ofreció una explicación posible a este desconcertante fracaso de todos los esfuerzos realizados hasta entonces para lograr el cultivo de tales bacterias. Su hipótesis se basa en que el organismo productor de la luz en *Photoblepharon* está tan especializado que es un simbionte forzoso; es decir, no puede sobrevivir aislado de su huésped.

Nealson propuso la teoría de que esta bacteria, a diferencia de las bacterias más especializadas, sólo puede metabolizar parcialmente la glucosa de su huésped. Por ello, en los cultivos genera probablemente concentraciones tóxicas de ácido pirúvico, que es un producto resultante de la oxidación incompleta del azúcar. Los enzimas del huésped que producen la destrucción del ácido pirúvico faltan en el medio de cultivo, con lo que el medio se carga tanto de ácido pirúvico que imposibilita la supervivencia de las bacterias. El fenómeno se observó en otros simbiontes similares (aunque no forzosos). Por fortuna, las luces de los ejemplares vivientes en el Steinhart Aquarium han permanecido encendidas desde marzo de 1975. En el momento de escribir estas líneas, las luces han ido ganando en intensidad lumínica, a medida que los peces se fueron acostumbrando a las condiciones ambientales de acuario.

Cuando por primera vez disequé un ejemplar de *Photoblepharon* para examinar su estado sexual y el contenido estomacal, quedé sorprendido al descubrir una cantidad considerable de una sustancia grasa dispersa por el celoma, que es el espacio que queda entre la pared del cuerpo y el tracto digestivo. Esta sustancia, que tiene la consistencia de la manteca de cerdo a la temperatura ambiente, es quizás una reserva de energía. Presumiblemente, proporciona la energía necesaria, al pez y a las bacterias, durante los períodos lunares en los cuales *Photoblepharon* se muestra menos activo que en otros y ayuna.

La baja densidad del material graso puede hacer aumentar excesivamente la flotabilidad del pez, quien lo compensa reduciendo el volumen de gas contenido en la vejiga natatoria; este proceso es típico de los peces para controlar su flotabilidad. En comparación con los peces no luminosos, la vejiga natatoria es mucho más ancha. Para los biólogos, el que la vejiga natatoria de *Photoblepharon* sea reducida constituye una feliz circunstancia evolutiva; gracias a ella, los ejemplares pueden ascender a la superficie desde aguas profundas sin que se presente el problema, de otra manera común, de ruptura de la vejiga natatoria por expansión del gas contenido.

Los peces luminosos destellantes constituyen, además, un caso insólito entre los organismos bioluminiscentes, toda vez que su luz permanece más tiempo encendida que apagada. Para apagarla,

BACTERIAS EMISORAS DE LUZ en un ejemplar de *Photoblepharon palpebratus,* fotografiadas al microscopio electrónico, con un aumento de 7500 diámetros. Las bacterias son las estructuras elípticas y redondeadas que se observan en el interior de los compartimentos en torno al vaso central, el cual proporciona a las bacterias simbiontes (es decir, huéspedes) el alimento que ellas recaban de la sangre del pez.

BACTERIAS LUMINOSAS, aumentadas en 28.500 veces. Los filamentos oscuros son flagelos; no está clara cuál sea su función. Los círculos interiores son artefactos ocasionados por la evaporación de gránulos debida a la acción del haz electrónico, en el proceso de toma.

Photoblepharon corre simultáneamente una cortina negra sobre cada uno de sus órganos luminosos, bloqueando completamente la luz, en un movimiento que puede compararse al del parpadeo. El índice de parpadeo varía en relación con la temperatura del agua y las condiciones del medio. Cuando en un acuario habitado por *Photoblepharon* se introducen artemias (pequeños crustáceos de los que habitualmente se alimenta), inmediatamente se inicia una rápida secuencia de parpadeos; ello sugiere la idea de que los peces se comunican la información unos a otros.

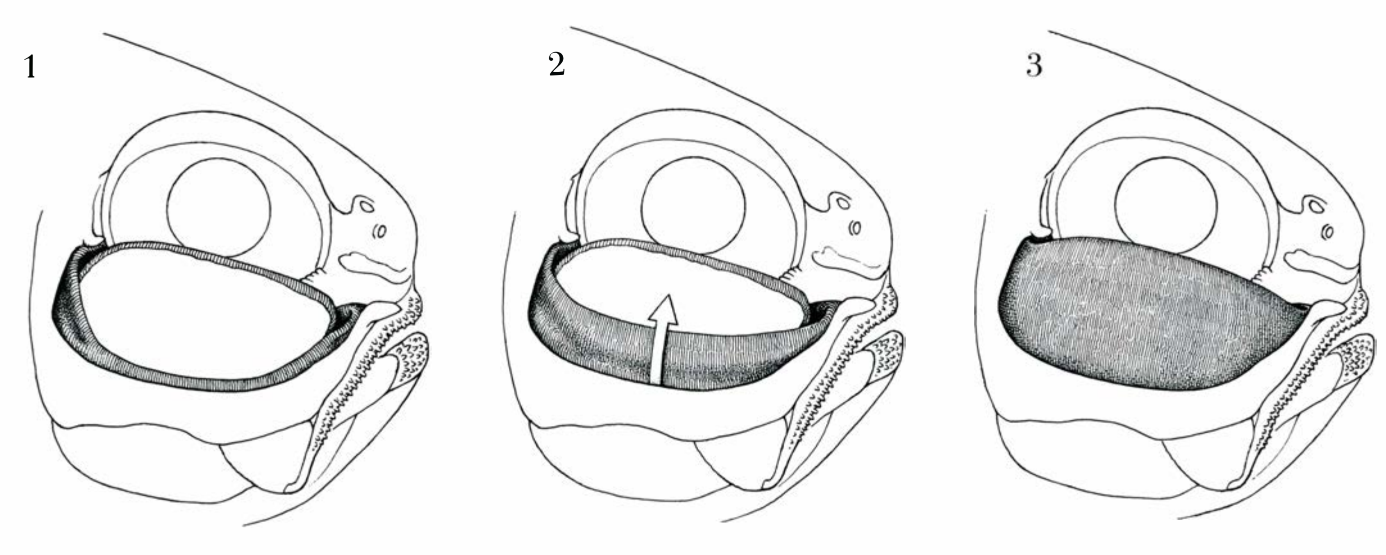
En relación con sus depredadores, *Photoblepharon* recurre a la emisión de un rápido destello de luz que los detiene momentáneamente, dándole tiempo de escapar. Además, los estudios efectuados con los peces vivientes en nuestro acuario han puesto de manifiesto una interesantísima adaptación, que, a buen seguro, utilizan para confundirlos: cada vez que un *Photoblepharon* en movimiento apaga su luz, cambia de dirección. Al poco tiempo, vuelve a encenderla de nuevo; desde el punto de vista del depredador, sin embargo, el lugar donde reaparecerá la luz resulta imprevisible.

Este comportamiento es continuo. Ello hace que resulte muy difícil a un depredador seguirle la pista a un *Photoblepharon.* Morin ha observado el comportamiento en un ambiente natural, registrando un promedio de frecuencia de 75 parpadeos por minuto, con un promedio de duración de 160 milésimas de segundo por cada uno. Estos valores corresponden a un "apagón y cambio".

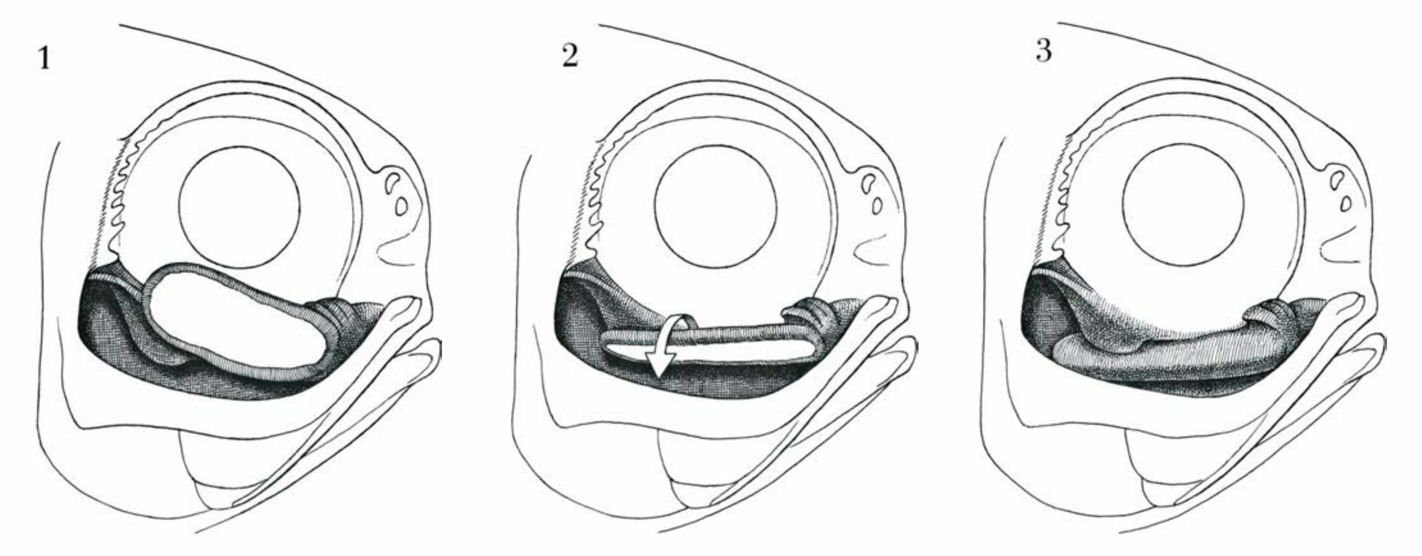
Mediante el recurso a técnicas fotométricas, Morin y sus colegas diseñaron varios modelos básicos de comportamiento en la actividad bioluminiscente del *Photoblepharon,* el más inmediato de los cuales es un parpadeo poco frecuente. (La mayoría de los demás organismos bioluminiscentes rutilan en vez de parpadear.) Este modelo es típico de un *Photoblepharon* no excitado, durante la noche. Parpadea a un promedio de 2,9 veces por minuto, teniendo cada parpadeo un promedio de duración de 260 milésimas de segundo.

Un segundo modelo sugiere la existencia de un ritmo más o menos diario en la frecuencia espontánea de parpadeo de los peces mantenidos en oscuridad permanente. El ritmo de parpadeo aumenta notablemente en las horas diurnas, y la duración del mismo también es algo mayor. La frecuencia media es de 37 parpadeos por minuto; cada uno de ellos dura un promedio de 800 milésimas de segundo.

Varios ejemplares de *Anomalops* que llegaron al Steinhart Aquarium en un estado débil, con sus luces apagadas, proporcionaron la oportunidad de comprobar la hipótesis de que estos peces utilizan su luz para ver mejor. Cuando



OSCURECIMIENTO del organo luminoso en *Photoblepharon palpebratus.* **El mecanismo se parece a un párpado, con la salvedad de que, en posición normal** *(1),* **permanece plegado debajo del órgano luminoso y, para apagar la luz, el pez lo levanta** *(2 y 3)* **(Dibujos de Tom Prentiss).**



MECANISMOS DIFERENTES sirven para apagar la luz de *Anomalops katoptron.* **El órgano luminoso se encuentra articulado a la parte anterior por medio de un músculo** *(1).* **El pez emplea el músculo** *(2 y 3)* **para hacer girar el órgano hacia abajo, e introducirlo en una bolsa.**

en el tanque que ocupaban se introdujeron artemias, los peces carentes de luz tardaron largo tiempo en descubrirlas. Las artemias, por el contrario, fueron devoradas inmediatamente cuando en la habitación se encendió una luz de intensidad aproximadamente igual a la intensidad de la luz natural producida por los peces.

Intentamos inútilmente restituir a estos peces su luz natural. Nuestro primer ensayo consistió en reinfectar los órganos de los *Anomalops* con un cultivo de bacterias procedentes de órganos brillantes de *Photoblepharon*. No dio mejor resultado colocar en el tanque de los peces cuyos órganos estaban apagados a otros con los órganos encendidos, a pesar de que las muestras de agua evidenciaron la presencia de numerosas fotobacterias. Las pruebas efectuadas por Edward E. Miller, del laboratorio del Steinhart Aquarium, para transferir a *Anomalops* bacterias extraídas de *Photoblepharon* mediante una aguja hipodérmica, tampoco tuvieron éxito.

El fracaso de todos estos esfuerzos sugiere que cada especie podría proporcionar a las bacterias un medio diferente para su desarrollo. La respuesta, no obstante, podría ser más complicada, según han descubierto Nealson y Edward Ruby en la Scripps Institution, trabajando con los peces pinocho. Sus resultados preliminares indican que cada pez pinocho *(Cleidopus gloriamaris)* es colonizado por un clon diferente de bacterias, lo que de hecho convierte a cada pez en un caso particular.

El hombre ha sabido aprovechar el hecho de que los peces luminosos atraigan a las presas mediante su órgano luminoso. Dado que estos peces capturan a otros, menores que ellos, incitándoles con su luz, los pescadores de las islas Banda, en Indonesia, pensaron que los peces mayores también serían atraídos por ella. Harvey observó, en 1922, que los pescadores de las islas Banda extirpaban el órgano luminoso de los peces y lo colocaban en sus sedales sobre el anzuelo para atraer a otros, actuando así como un verdadero cebo. El órgano desempeña su función luminosa largas horas, es decir, mientras las bacterias continúan brillando. Otros pescadores indonesios idearon un sistema diferente para sacar provecho de esa propiedad luminosa sin dañar a los peces; comenzaron a suspender bajo su canoa unos trozos de bambú perforados, en cuyo interior se coloca una docena o más de *Photoblepharon* vivos, pudiendo pescar así varias noches seguidas con el mismo cebo.

A pesar de que el órgano luminoso es, en esencia, el mismo en todos los anomalópidos, el modo cómo funciona difiere considerablemente de unos a otros. *Anomalops* apaga su luz imprimiendo al órgano una rotación hacia abajo, lo cual induce su introducción en el interior de una bolsa. (El órgano está articulado sobre la frente.) *Photoblepharon* consigue lo mismo deslizando sobre el órgano una cortina negra. La cortina recuerda la naturaleza del párpado.

Los ejemplares de *Kryptophanaron* capturados recientemente pueden proporcionarnos la razón de estas diferencias. Rosenblatt y Montgomery han constatado que el órgano luminoso puede bascular, aunque también se encuentra asociado al mismo una membrana. Ello supone que *Kryptophanaron* controla los apagones por ambos procedimientos, a saber, haciendo girar el órgano y cubriéndolo con una cortina; recurre al movimiento de rotación para oscurecer la luz durante períodos largos, en tanto que se sirve de la cortina para producir parpadeos rápidos. Rosenblatt y Montgomery consideran que ambos mecanismos se encontrarían ya en los antepasados de *Kryptophanaron* y en los de *Photoblepharon* y *Anomalops*.

Si este supuesto es correcto, la membrana de *Krytophanaron* y de sus antepasados constituiría la génesis del mecanismo de oscurecimiento empleado por *Photoblepharon*, una especie que se mantiene cerca del fondo, en el hábitat que se supone ocuparon sus antepasados. *Anomalops* ha evolucionado, abandonando las aguas profundas para alimentarse de plancton durante la noche, en las proximidades costeras. Este cambio evolutivo comportó ciertas modificaciones en el comportamiento, como la formación de grandes cardúmenes y un rápido y continuo parpadeo. Ambas adaptaciones hacen que, a un depredador, le cueste identificar a un individuo aislado dentro del conjunto. Rosenblatt y Montgomery han explicado el proceso evolutivo de la siguiente manera: "En aguas claras, cerca de la superficie y sin los obstáculos que supone el arrecife, un depredador puede ver el órgano luminoso e iniciar la acometida desde una considerable distancia. Un rápido parpadeo y un pequeño cambio de dirección simultáneo (según hace *Photoblepharon*) puede requerir solamente una pequeña corrección, por parte del depredador, una vez que la luz vuelva a encenderse de nuevo. En cambio, en *Anomalops* la luz se apaga durante un período relativamente largo y todos los miembros del cardumen parpadean. Este mecanismo puede mejorar su eficacia, es decir, puede disminuir las posibilidades de que el depredador fije su atención en un solo ejemplar. Así pues, el destello intermitente de los *Anomalops* reduce el peligro de ataque por parte de los depredadores que conlleva la utilización de la luz para alimentarse y mantenerse unido el cardumen."

Todavía quedan por explicar muchas cuestiones interesantes del mundo de los anomalópidos. ¿Cuál es la conducta de *Kryptophanaron*, el pez que nadie ha podido observar vivo? ¿En qué se parece y en qué se distingue el comportamiento de las bacterias en el interior del órgano luminoso de cada especie de *Kryptophanaron* y cuál es el comportamiento de éstas en relación con *Photoblepharon* y *Anomalops*? ¿Han evolucionado las bacterias simbiontes en un grado distinto del de sus huéspedes? ¿Cómo adquieren las larvas de los peces sus bacterias? ¿Se introduce la fotobacteria dentro del huevo, permaneciendo en estado de letargo hasta el momento en que la bioluminiscencia adquiera importancia para la supervivencia de los jóvenes? Las respuestas a todas y cada una de estas preguntas requieren una combinación de perseverancia y suerte, tras repetidas observaciones de los peces en su medio natural, o experimentando con ellos en el acuario.

Por último, encaja aquí perfectamente la descripción de un experimento crucial que me ha sido sugerido por Nealson y J. Woodland Hastings, de la Universidad de Harvard, con vistas a sacar un mayor rendimiento a nuestras investigaciones sobre estos peces, un tanto esotéricos. Nealson y Hastings se hallan impresionados por la extraordinaria pureza de las colonias de bacterias que viven en los órganos luminosos de los peces destellantes; es decir, están admirados por la ausencia total de otras bacterias competidoras. Según ellos, tal coyuntura presupone la existencia en el pez de un sistema de inmunidad sumamente eficaz, del tipo de aquel que defiende a otros de la invasión de organismos extraños.

Nealson y Hastings llegan a apuntar que un genetista podría substituir cierta información genética innecesaria de la bacteria por otra que controlase operaciones útiles para el cuerpo humano. Un ejemplo de ello sería un sistema enzimático capaz de desencadenar la producción de insulina en un individuo diabético. Ligando tal sistema a una fotobacteria, los genetistas podrían tener una medida visible de la pureza de un cultivo. Cuando la luz está encendida puede presumirse que el cultivo se halla libre de contaminación. Una posibilidad maravillosa. A lo largo de mis inmersiones hasta los 50 metros de profundidad, en el Oceano Indico, en las noches sin luna, jamás supuse que las luces destellantes que perseguía pudiesen inducir a una tal conclusión.

Luz zodiacal

La materia micrometeoroidea no puede ser permanente y estable. La constancia global observada en la luz zodiacal resulta de un equilibrio dinámico en la densidad del polvo interplanetario

Francisco Sánchez y Antonio Mujica

El primer indicio que tuvo el hombre de la existencia del medio interplanetario fue la *luz zodiacal.* Hoy sabe que ni el espacio interestelar ni aún el intergaláctico están vacíos y que sus más diminutos pobladores pueden esconder la clave que permita resolver los principales problemas cosmogénicos y cosmológicos.

Recibe el nombre de medio interplanetario la materia contenida en el espacio interplanetario. Se puede definir el espacio interplanetario como aquella región comprendida entre la esfera de acción global del sistema solar y la correspondiente a cada uno de los planetas. Sus límites son confusos. Esta esfera de acción, que no tiene por qué ser una superficie esférica, marca el límite donde dejan de ser preponderantes los campos de fuerza propios. El medio interplanetario está fundamentalmente constituido por plasma (viento solar) y polvo (granos zodiacales o micrometeoroides). Micrometeoroides, polvo interplanetario o granos zodiacales son diversas maneras de nombrar a la nube de minúsculos pobladores del espacio interplanetario causantes de la llamada *luz zodiacal* por esparcimiento de luz solar (redistribución de la energía electromagnética incidente).

Actualmente los astrónomos están convencidos de que la presencia de pequeñas partículas sólidas en el espacio interplanetario, en el interestelar y en el intergaláctico, desempeña un importante papel en la historia del Universo. No es extraño que dentro de la astrofísica vaya cobrando creciente interés el estudio de este fino polvo que el perfeccionamiento progresivo de las técnicas observacionales va encontrando en todas partes. Hay pruebas observacionales en relación con la formación de estrellas en el seno de las extensas nubes de polvo y gas del medio interestelar. También resulta cierto que roturas sucesivas de grandes cuerpos celestes darán como resultado final pequeños granitos de polvo. He aquí una sencilla cuestión de interés fundamental: El polvo cósmico que puebla lo que hasta hace poco se consideraba vacío ¿es el residuo final de la evolución catastrófica del Universo que conocemos? ¿Es, por el contrario, el embrión de un joven universo en formación?

Resulta razonable pensar que, de la misma manera que el sol nos permite observar de cerca la vida de las estrellas, el estudio del polvo zodiacal es un buen camino para avanzar en el conocimiento del polvo cósmico.

Señalar los objetivos finales de un campo de investigación no suele ser empresa demasiado difícil. Los problemas aparecen al tratar de proponer objetivos parciales escalonados que faciliten un avance eficaz hacia las metas finales. En el caso que nos ocupa, se pretende conocer: situación, extensión y densidad de la nube zodiacal; naturaleza, dimensiones y origen de los granos; su relación con los otros cuerpos del sistema solar y medio interestelar, así como el papel que representan en el proceso evolutivo general.

Actualmente se aborda el problema de manera diversificada, estudiando las muestras de polvo interplanetario depositado en los fondos oceánicos y nieves polares, el que permanece en suspensión en la atmósfera; también, el que pueda recogerse en otros planetas y en el propio espacio interplanetario. No obstante el análisis óptico de la luz zodiacal, ya sea realizado desde la tierra o mediante instrumentos a bordo de vehículos extraatmosféricos, sigue siendo la principal fuente de datos sobre los micrometeoroides.

Lejos de las grandes ciudades, cuya atmósfera lo enturbia todo, durante las noches sin luna, se nota un ambiente bañado por una tenue claridad que no produce sombras: es la llamada "luz del cielo nocturno".

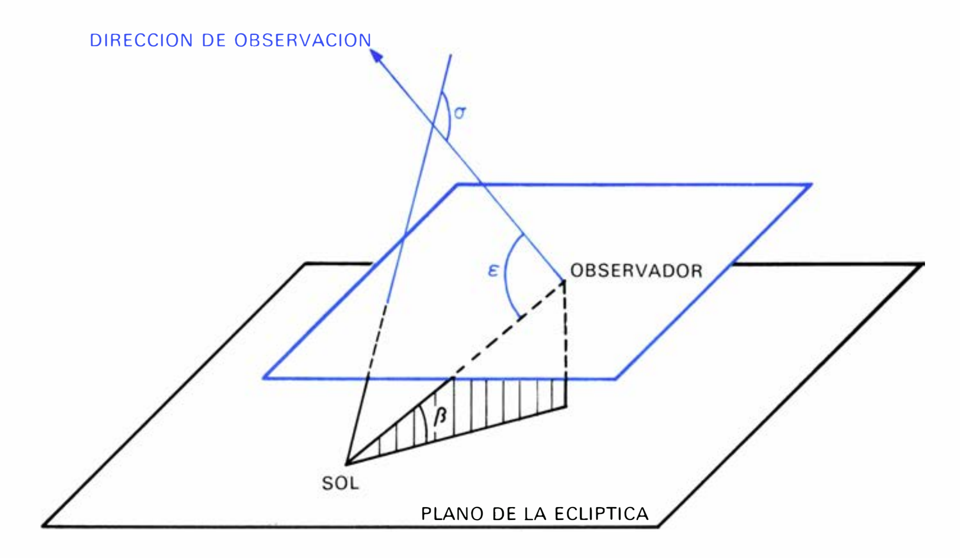
Lo primero que se piensa es que esta luz es el resultado acumulativo de la luminosidad de todas las estrellas. Pero no es exactamente así; la luz del cielo nocturno está constituida por fenómenos de origen terrestre, a saber, auroras, luminiscencia del aire y luz esparcida por la atmósfera, y por fenómenos de origen extraterrestre, a saber, luz zodiacal, luz estelar, luz galáctica y luz extragaláctica.

A los instrumentos de observación situados en la superficie de la tierra llega mezclado este cúmulo de luces, de tan distinto origen. Su analogía de espectro continuo (emisión electromagnética no resoluble en líneas y bandas espectrales), junto con su bajísimo brillo, hacen que la separación, para su estudio sistemático, sea un problema muy complicado.

Centrándonos en lo que constituye el objeto del presente artículo, la luz zodiacal, conviene empezar diciendo que

CURIOSA FOTOGRAFIA obtenida en el Observatorio del Teide del I.A.C. en la Isla de Tenerife (Canarias), el 17 de agosto de 1966, en la que aparecen alineados sobre el horizonte y casi en conjunción Mercurio, Venus, Marte y Júpiter. El cono de luz zodiacal, visible sobre las primeras luces del crepúsculo matutino, tiene materializado su eje de simetria por Venus, Marte y Júpiter (Francisco Sánchez).





GEOMETRIA DEL PROBLEMA de esparcimiento de la luz solar por los granos interplanetarios. Representando ϵ: ángulo de elongación al sol; θ: ángulo de esparcimiento; β: latitud eclíptica. La energía electromagnética recibida en la dirección de observación es el flujo luminoso esparcido en dicha dirección por todos los granos interplanetarios incluidos en el cono de observación.

puede observarse a simple vista. Eligiendo el lugar y el momento oportunos, se puede disfrutar, sobre todo en las zonas tropicales, del bonito y atrayente espectáculo que se ve en la fotografía adjunta.

Después del crepúsculo vespertino y antes del matutino, en las noches limpias y negras (sin luna, ni luces artificiales), se distingue con claridad una pirámide de luz débil que, siguiendo la eclíptica (trayectoria aparente del sol en la bóveda celeste), parece llegar con su vértice hasta el cenit. Precisamente el nombre de luz zodiacal le viene de verse sobre las constelaciones zodiacales (las situadas en la eclíptica y que dan nombre a los signos del zodiaco).

Hasta no hace mucho, se pensaba que la luz zodiacal sólo era observable en la banda eclíptica, pero en la actualidad se detecta sobre todo el cielo. Para hacer mediciones, no obstante, se requiere instrumental adecuado, buen lugar de observación y un método eficaz para descontaminarla del resto de la luz del cielo nocturno.

Otro fenómeno óptico, cuyo origen interplanetario ya no ofrece ninguna duda, es el llamado "gegenschein". Se trata de una pequeña mancha luminosa extremadamente débil, observable en el punto diametralmente opuesto al sol de la bóveda celeste y que se mueve con igual velocidad. Sólo resulta visible sin instrumentos para un observador experimentado y en las mejores condiciones atmosféricas.

Conviene recalcar que tanto la luz zodiacal, como el gegenschein y la corona-*F* (parte externa de la corona solar) son producidos por el mismo mecanismo: esparcimiento de la luz solar por los minúsculos granos sólidos que pueblan el espacio interplanetario. Para elongaciones (separación angular de la dirección de observación al eje sol-observador) menores de 20 grados, el fenómeno óptico recibe el nombre de corona-*F;* para elongaciones cercanas a ciento ochenta grados, se le llama gegenschein, y, sobre el resto del cielo, luz zodiacal. En este artículo, por simplificación, se engloban estos fenómenos bajo el nombre genérico de luz zodiacal.

El estudio de la luz zodiacal data de muy antiguo. Ya en 1672 el astrónomo francés Cassini dio una explicación aceptable de su origen. Más de un siglo después Arago escribía: "La luz zodiacal, no obstante haber sido estudiada científicamente desde hace aproximadamente dos siglos, plantea aún a los cosmólogos un problema que no han podido resolver de forma completa... La cuestión es importante y nadie hasta el momento se puede vanagloriar de haberla resuelto definitivamente". Estas palabras, a pesar del camino recorrido, siguen teniendo vigencia y constituyen un reto para los astrofísicos.

Si bien la mayoría de los grandes astrónomos de todos los tiempos hacen referencia y hasta profundizan a veces en la luz zodiacal, las primeras mediciones cuantitativas sobre su polarización fueron hechas en 1925 por Dufay: se usaron para determinar la densidad de electrones libres en el espacio. En 1947, Van de Hulst dio una explicación rigurosa teórica del fenómeno y, a partir de ese momento, las observaciones se van haciendo cada vez más precisas y los modelos menos especulativos.

Parece que en la cultura egipcia figuraba representada por un triángulo. Pero, cosa curiosa, no se ha encontrado ninguna alusión en el mundo griego y romano. Los árabes la llamaban "falso crepúsculo". Humboldt afirma que los aztecas ya la conocían en 1509.

Entre los que de forma más completa abordaron el estudio de la luz zodiacal se puede citar a Wendelin y Childreg en el siglo XVI, Cassini en el XVII, Mairan en el XVIII. En el siglo pasado Liais, Marchand, Dechevrens, Brorsen. Al comenzar nuestro siglo, las teorías sostenidas para explicar el fenómeno van, desde los que colocan su procedencia en las zonas más lejanas del Universo, hasta los que ven su origen en una "corriente de ampère terrestre" o en los supuestos "contra-alisios". Poco a poco van ganando solidez y seguridad las teorías que explican las observaciones sobre la existencia de un medio interplanetario constituido fundamentalmente por granos microscópicos.

Como anteriormente se ha dicho, la principal fuente de conocimiento en este campo sigue siendo el análisis óptico de la luz zodiacal, tanto si se hacen las mediciones con el instrumento en la superficie terrestre, como si se hacen embarcado en una sonda interplanetaria.

Al igual que en cualquier campo de la astrofísica, también aquí la piedra de toque es la observación. La teoría, el modelo más coherente y acabado es cuestionado por los resultados experimentales. Para calibrar la seguridad del terreno que se pisa en todo lo referente a la luz zodiacal es necesario conocer, aunque sea de forma somera, los procedimientos y técnicas de observación usados.

En la ilustración de esta página se muestra la disposición geométrica del esparcimiento de la luz solar por los granos interplanetarios. No se prejuzga en este esquema si el observador está sobre la superficie terrestre o a bordo de una nave espacial. La energía electromagnética que recibirá en la dirección de observación será el flujo luminoso esparcido en dicha dirección por todos los granos interplanetarios incluidos en el cono de observación. Su contribución, como es bien sabido, estará en razón inversa a la distancia grano-observador.

La luz solar esparcida por el medio interplanetario está "marcada" tanto por la naturaleza y propiedades físicas de los granos, como por su distribución

espacial. Transporta precisamente la información que se necesita. Es preciso extraerla midiendo, en el mayor número posible de dominios espectrales, luminancias (flujo luminoso emitido por unidad de superficie en una dirección) y estado de polarización. En este tipo de trabajos se usa como unidad de luminancia la "estrella por grado cuadrado" (S_{10}): número de estrellas de tipo solar de décima magnitud que, de estar distribuidas uniformemente sobre un grado cuadrado, producirían una luminancia igual a la de la fuente problema.

Cuando el telescopio está situado en la superficie terrestre, lo que el instrumento recibe es una mezcla de luz zodiacal, de luz estelar, de luz galáctica y de luz producida en la atmósfera (airglow), alterado todo por extinción y esparcimiento en la propia atmósfera. La separación de las tres componentes constituye la dificultad mayor de las observaciones de luz zodiacal y es responsable de las discrepancias en los resultados publicados por diferentes autores. Si las mediciones se hicieran desde el espacio, se evitarían los problemas atmosféricos, pero aumentaría la imprecisión en relación a la separación de la luz estelar.

La descontaminación de la luz estelar de fondo es uno de los principales factores que intervienen en la obtención de un correcto valor de la luminancia zodiacal. Las medidas hay que hacerlas a latitudes galácticas mayores de treinta grados, con objeto de aminorar el efecto de la luz galáctica. Resulta ventajoso utilizar instrumentos de pequeño campo a fin de poder excluir del mismo las estrellas más brillantes. La luz estelar de fondo que aún queda se elimina utilizando los datos de luz estelar integrada dados por tablas como las de Megill y Roach (cuentas de estrellas por magnitudes y áreas celestes). Este paso no es demasiado fiable, pero tal corrección sólo podrá ser mejorada cuando se hagan observaciones de fondo estelar desde fuera de la nube zodiacal.

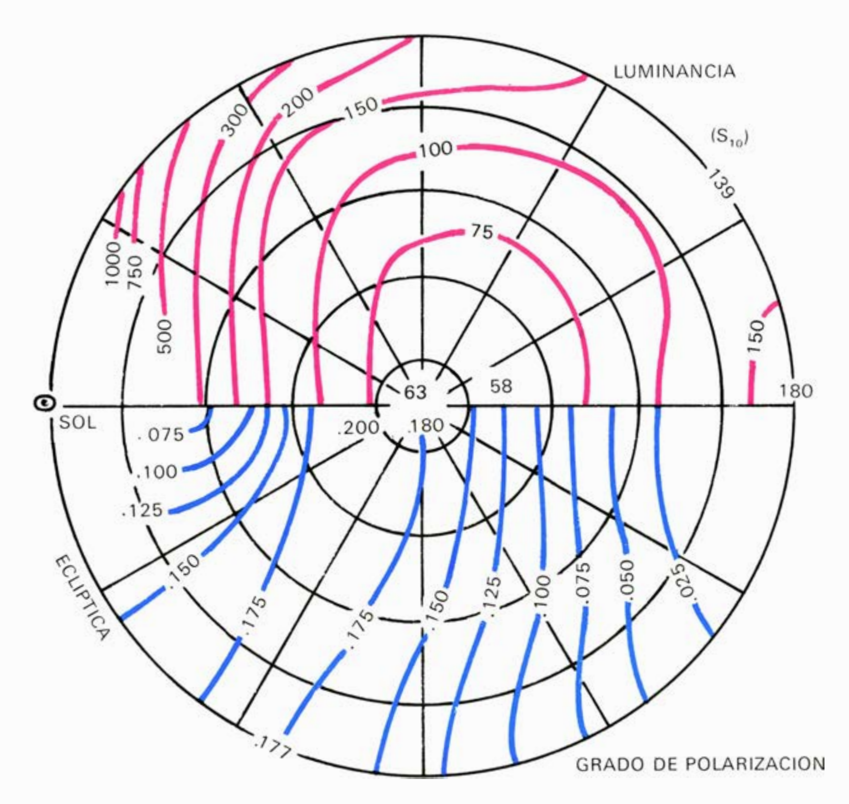
El espectro continuo atmosférico se produce casi todo en una capa situada entre los 90 km y los 120 km de altura. A este continuo se superponen líneas y bandas de emisión. Entre dichas líneas y bandas se pueden encontrar intervalos espectrales sólo contaminados por la emisión continua atmosférica, que constituyen auténticas ventanas para la observación de la luz exterior. A pesar de ello, descontaminar el continuo que aún queda es difícil, porque además sufre variaciones temporales y espaciales. Entre los diferentes procedimientos empleados, parece el más ajustado el desarrollado por Dumont, que se basa en la correlación encontrada entre el continuo a 5000 Å y la intensidad de la línea de emisión del oxígeno neutro a 5577 Å. El método, que supone la luz extraterrestre constante a lo largo de una noche, permite una descontaminación individual para cada dirección de observación. Su aplicación es laboriosa, pues se precisan mediciones en el polo celeste y en un punto fijo de la esfera celeste a distintas distancias cenitales.

Para corregir el esparcimiento atmosférico se aplica la solución del esparcimiento Rayleigh a modelos simplificados de atmósferas. Se estima que los errores en esta corrección son siempre menores que el diez por ciento.

Las determinaciones polarimétricas duplican el proceso de reducción señalado para luminancias, al precisar el uso de analizadores polarizantes. Separado el flujo luminoso en dos componentes, una en la que el vector eléctrico es normal al plano de esparcimiento y otra en la que es paralelo, se define el grado de polarización como la relación entre la diferencia y la suma de ambas componentes.

Después de este complicado proceso de reducción, muy afectado por la bondad del procedimiento de descontaminación y por la calidad del lugar de observación, se llega a los valores numéricos de luminancia y polarización de la luz zodiacal. La ilustración de esta página resume los resultados medios obtenidos en el Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias, desde 1964 a 1975. Dichas medidas están consideradas por los investigadores teóricos como la referencia experimental más fiable de las que cubren el cielo.

La simetría de la nube interplanetaria causante de la luz zodiacal hace que sean del máximo interés las mediciones sobre la eclíptica. En las ilustraciones de las páginas 94 y 95 se reproducen los valores medios correspondientes a luminancias y grados de polarización en función de la elongación a una unidad astronómica (UA) del sol. La representación llega tan sólo a 180°, puesto que hay simetría en relación al punto antisolar. Resulta bien claro el aumento de luminancia en torno a dicho punto antisolar (gegenschein) y el fuerte gradiente que aparece en las cercanías al sol. La forma de la curva de polarización hoy, después de las mediciones ex-



LUMINANCIAS Y GRADO DE POLARIZACION de la luz zodiacal sobre todo el cielo. Están representados valores promedios de observaciones realizadas en el Observatorio del Teide (I.A.C.) entre 1964 y 1975. Sobre las circunferencias se representan los ángulos que forman la dirección sol - observador con la dirección de observación; y sobre los radios, y a partir de la circunferencia exterior, las latitudes eclípticas. Si se representaran sólo las curvas de uno de los semicírculos, todo el diagrama sería simétrico respecto del diámetro horizontal. Por ello se ha empleado el semicírculo superior para representar las luminancias y en el inferior los grados de polarización.

traatmosféricas, es aceptada por todos los autores. Las discrepancias están en los extremos, donde algunos experimentadores encuentran valores negativos para esta magnitud. El grado de polarización es independiente de la distribución espacial de polvo y es un excelente indicador de las propiedades ópticas del mismo. Muchos autores utilizan, en lugar del grado de polarización, la intensidad de polarización (grado de polarización multiplicado por la luminancia) por considerarlo de mayor precisión.

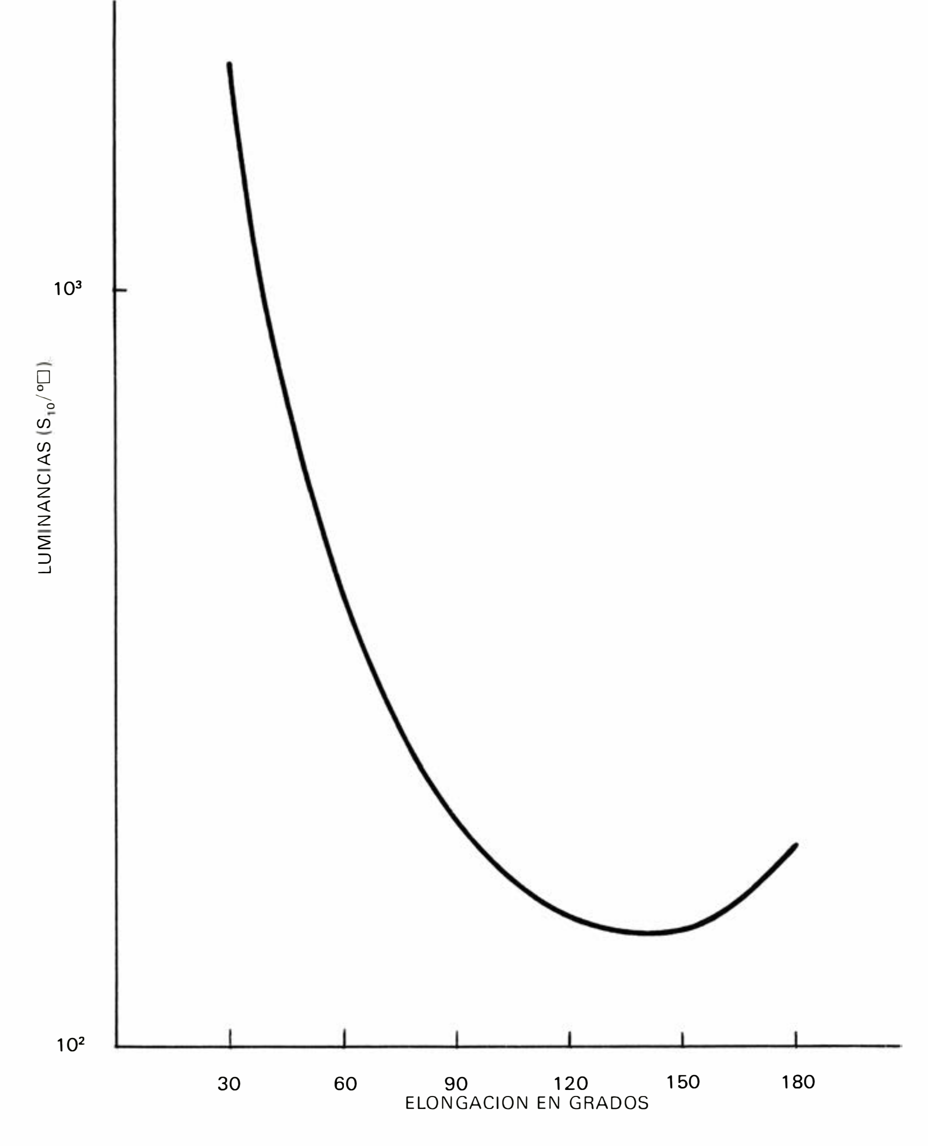
El estudio de la dependencia de la polarización respecto de la longitud de onda es uno de los mejores caminos para llegar a determinar la naturaleza de las partículas. La dificultad está en lo costoso que resulta obtener mediciones de alta calidad.

Como parámetro para conocer el color de la luz zodiacal se toma el cociente de la relación de luminancias de la luz zodiacal a la solar para dos longitudes de onda. Dentro de la precisión en relación con los datos experimentales que se tienen, el color de la luz zodiacal es igual al de la luz solar en el espectro visible: fuera de esta región hay un azulamiento y un enrojecimiento en las regiones del ultravioleta y del infrarrojo próximo. Se subraya la importancia de este parámetro en la determinación de la distribución de tamaños de los granos interplanetarios.

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, queda patente la dificultad que encierra la observación de la luz zodiacal y la necesidad de aumentar la calidad de las mediciones. En este sentido, se concentra el esfuerzo de los grupos de investigación más activos.

Existen dos posibles caminos a seguir en la interpretación de las observaciones de luz zodiacal. Uno consiste en construir teóricamente modelos razonables y comparar las conclusiones que de ellos se sacan con las observaciones, admitiendo que el modelo que mejor se ajusta es el que va a dar la mejor información sobre la distribución espacial del polvo, su naturaleza, etc. El otro camino consiste en derivar directamente de las observaciones, mediante procedimientos matemáticos, los parámetros fundamentales de la nube. Este método ha sido hasta el momento poco explotado; sin embargo, pensamos que es el que más porvenir tiene, porque cada día se dispone de nuevas mediciones hechas con sondas espaciales a diferentes distancias heliocéntricas. Weinberg, utilizando medidas de luminancia obtenidas por el *Pionneer 10* entre 1 U.A. y 2,8 U.A. de distancia heliocéntrica (r) y aceptando una distribución en la densidad numérica de partículas de la forma $r^{-\beta}$, obtiene por esta vía $\beta \simeq 1$, valor que está de acuerdo con los propuestos por la mayoría de los autores. El otro método, el de los modelos a priori, tiene la desventaja de que una hipótesis incorrecta sobre uno de los parámetros influye sobre los restantes parámetros y se puede llegar a resultados ambiguos sobre la nube zodiacal. Ambos procedimientos incluyen en sus razonamientos propiedades de funciones de esparcimiento deducidos teórica o empíricamente en el laboratorio.

Cuando un instrumento mide luminancias está recibiendo luz esparcida de cada una de las regiones que incluye el cono de observación y la respuesta que da es debida a la integración de todos esos efectos. La contribución de la unidad de volumen del medio interplanetario a esa respuesta es proporcional al flujo solar incidente, a la densidad de partículas y a la función media de esparcimiento. Si Fo es el flujo solar a una unidad astronómica del sol y A es una distancia igual a una unidad astronómica, entonces el flujo a una distancia heliocéntrica igual a r es $Fo\left(\frac{A}{r}\right)^2$, siempre que r sea grande comparado con el radio del sol para poder considerarlo como fuente puntual. La densidad de partículas es una función de la distancia heliocéntrica y de la altura a la que se halla el elemento de volumen sobre el plano de simetría de la nube $n(r, h)$. La función media de esparcimiento $\sigma(\theta)$ también será en principio función de la posi-

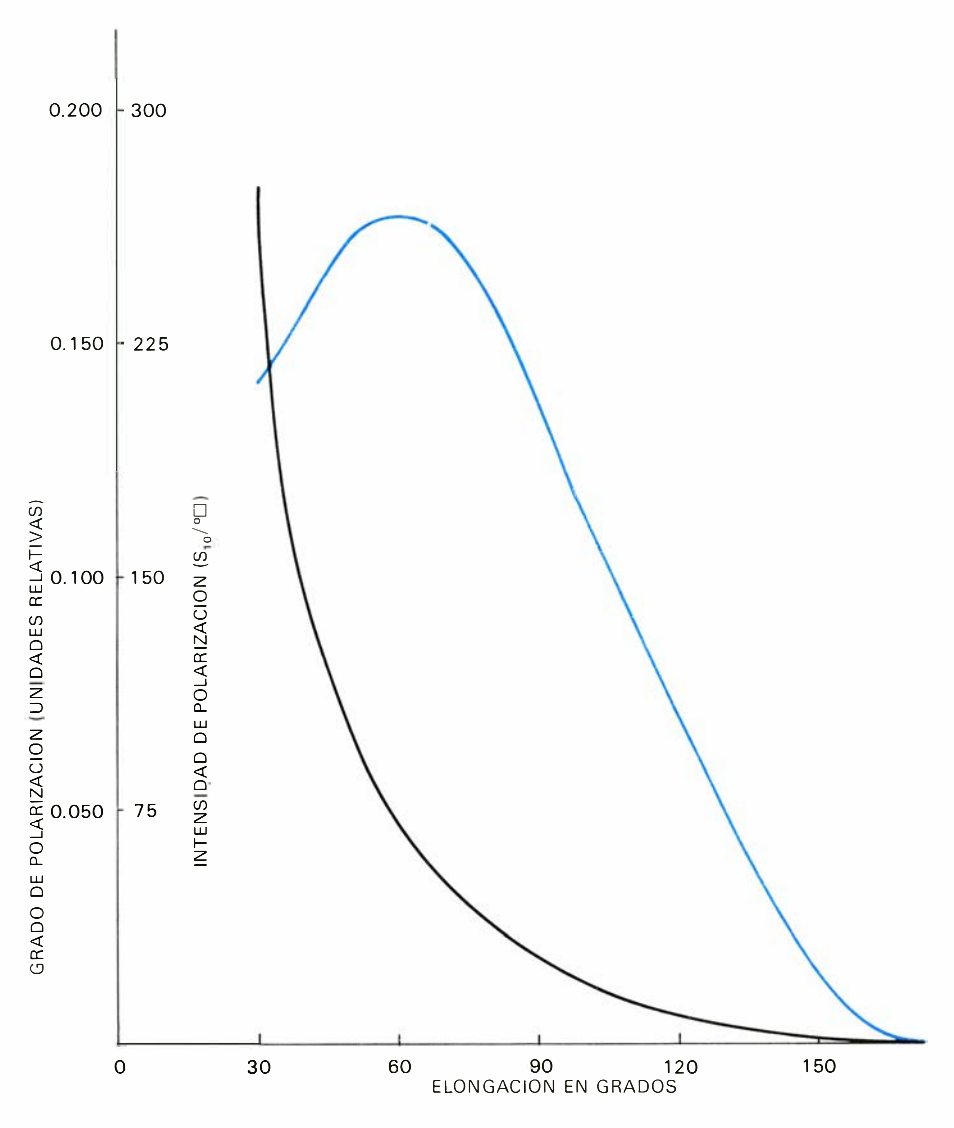


DISTRIBUCION DE LUMINANCIAS en el plano de la eclíptica para una unidad astronómica en función de la elongación ε. Sólo se ha representado hasta la elongación de 180° porque esta curva de valores medios de luminancias es simétrica respecto al punto antisolar (180°). Resulta muy claro el aumento de luminancia en la región antisolar (gegenschein) y el fuerte gradiente de luz zodiacal en las cercanías del sol, ya que es logarítmica la escala en el eje de ordenadas.

ción del volumen. El esparcimiento se supone simple, hipótesis que está perfectamente justificada por los valores admitidos para la profundidad óptica de la nube. El producto de estos tres términos integrado a lo largo de la dirección de observación dará la luminancia a una cierta distancia al sol (r) y para una elongación dada (ϵ). La función de esparcimiento se puede escribir como suma de dos términos que corresponden a las componentes polarizadas de la luz; utilizando cada uno de ellos en el proceso anterior obtenemos las componentes polarizadas de la luminancia.

Construir un modelo supone básicamente hacer hipótesis sobre las funciones n y σ para terminar haciendo un ajuste con los datos experimentales. La función n, además de la posición, depende del tamaño de la partícula, el cual viene dado normalmente a través del parámetro de talla, que es el cociente entre la longitud de la circunferencia máxima de la partícula, considerada como una esfera, y la longitud de onda. Esta n se escribe normalmente como el producto de una función del tamaño por otra de la posición. Para la función de talla generalmente se admite la forma de potencia de exponente negativo α^{-k}, donde α es el parámetro de talla y k una constante a fijar en cada modelo. Para la dependencia espacial se han propuesto diversas formas funcionales que han dado lugar a diferentes modelos. Así, el primer modelo de Gillett supone la nube de espesor constante, de forma que, a una cierta distancia por encima y por debajo del plano de simetría, la densidad de partículas en nula. La densidad, en un punto de la región donde se supone concentrada la nube, viene dada por el cociente entre la distancia sol-tierra y la distancia del sol al punto elevado a un exponente que hay que determinar para cada modelo. En el segundo modelo de Gillett, el espesor de la nube aumenta linealmente con la distancia al sol medida sobre el plano de simetría, y la expresión que da la densidad en la región donde está concentrada la nube es la misma del caso anterior.

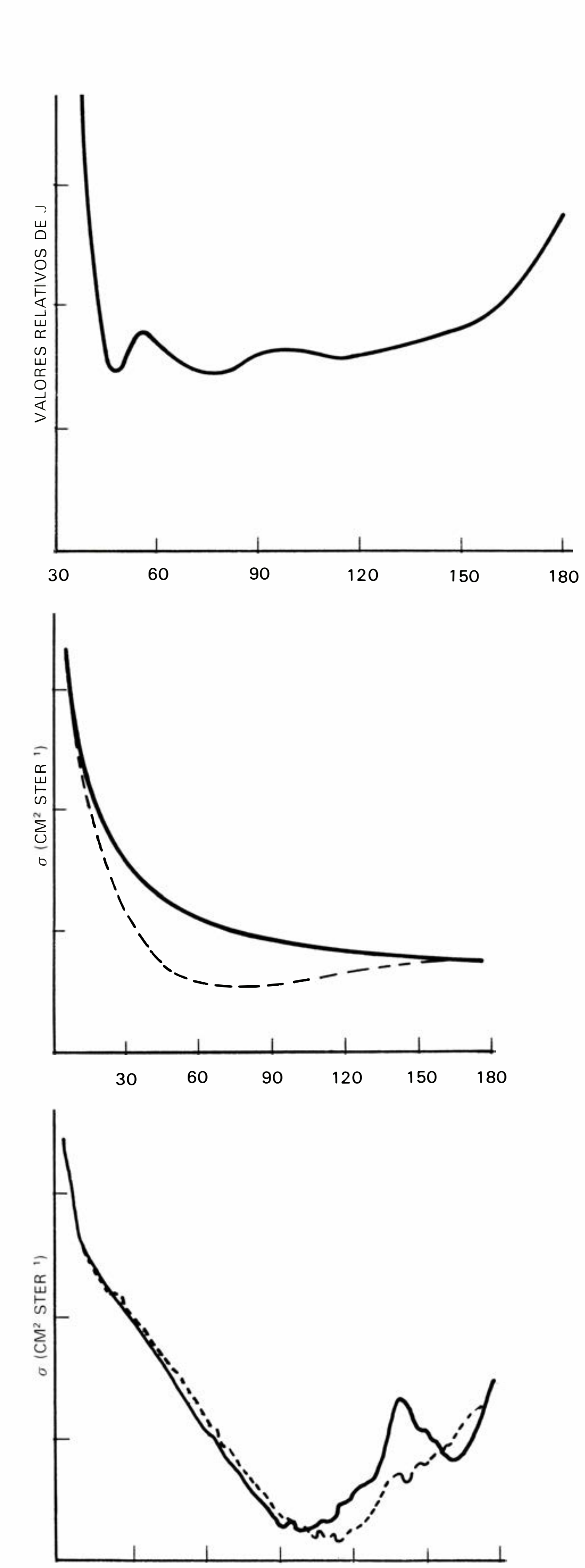
Otro modelo es el "modelo de cinturones", que sólo es válido para el plano de simetría de la nube: consiste en considerar la nube zodiacal dividida en coronas circulares centradas en el sol y limitadas por las órbitas de los planetas. Dentro de cada cinturón, se supone que las partículas tienen unas propiedades ópticas y una distribución de tallas peculiares. También se han propuesto funciones de forma exponencial y potencial para describir la densidad de partículas en el



DISTRIBUCION DEL GRADO de polarización y de la intensidad de polarización en el plano de la eclíptica y a una unidad astronómica, en función de la elongación al sol. La forma de la curva del grado de polarización, admitida por todos los autores después que se tuvieron observaciones desde el espacio resulta dudosa para valores cercanos proximos a los extremos.

plano de simetría, considerando las superficies de igual densidad, fuera de él, como elipsoides de revolución. La última función, la potencial, es la más usada. Se escribe de la forma $r^{-\beta}$, donde r es la distancia al sol y β una constante a la que se le han dado valores comprendidos entre cero y dos, pero que en la actualidad se cree que debe ser un número muy próximo a uno.

La función de esparcimiento depende del tamaño y del índice de refracción de las partículas. Cuando éstas son muy pequeñas, con parámetros de talla mucho menor que uno, ya sean dichas partículas de naturaleza conductora o dieléctrica, les corresponde una función de esparcimiento Rayleigh. En este caso, la intensidad esparcida depende considerablemente de la longitud de onda y la polarización tiene un máximo para un ángulo de esparcimiento de noventa grados. Si el parámetro de talla es mayor que dos ya no es válida la aproximación Rayleigh y hay que aplicar la teoría de Mie. Conviene recordar que Mie, en 1908, encontró la solución de las ecuaciones de Maxwell para la luz esparcida por esferas homogéneas de cualquier diámetro y composición, sin que todavía esté resuelto el problema cuando la forma de las partículas es irregular. La ley de Rayleigh resulta ser un caso particular de la teoría de Mie cuando las esferas tienen dimensiones comparables a la longitud de la onda electromagnética. Hasta un valor cinco del parámetro, las partículas dieléctricas muestran un claro efecto sobre la polarización. Para valores mayores, las partículas absorbentes presentan casi siempre polarización positiva y el esparcimiento es intenso. Cuando el parámetro de talla es mayor que quince, la función se puede aproximar, para ángulos de esparcimiento pequeños, con el modelo de difracción de un disco



FUNCIONES DE ESPARCIMIENTO de luz zodiacal. Los parámetros de estas funciones definen la naturaleza y propiedades físicas de los granos causantes del esparcimiento luminoso. En el grabado superior, se representa la función empírica de esparcimiento de la nube zodiacal (según modelo de Dumont y Sánchez) *(a).* **En el centro, la función de esparcimiento para una mezcla de partículas absorbentes con parámetros de talla comprendidos entre 2 y 120 (según Giese)** *(b);* **y, abajo, la función de esparcimiento para una mezcla de partículas dieléctricas con parámetros de talla comprendidos entre 12 y 120 (según Giese)** *(c).* **La línea continua corresponde a la componente normal al plano de observación y la línea a trazos corresponde a la componente paralela al mismo.**

circular del mismo diámetro que la partícula. Y para ángulos grandes, las partículas metálicas con la reflexión Fresnel y las dieléctricas con la misma reflexión superponiéndole términos de refracción.

Debido a las dificultades matemáticas que presenta la resolución de las ecuaciones de Maxwell para un cuerpo difusor genérico de forma cualquiera, las funciones de esparcimiento que se utilizan son las deducidas de la teoría de Mie para gránulos esféricos o de otras formas regulares sencillas, como cilindros. También se ataca el problema obteniendo experimentalmente las funciones en el laboratorio. Normalmente, en los modelos se consideran partículas esféricas porque las distribuciones de partículas de formas irregulares pueden ser aproximadas por distribuciones equivalentes de partículas esféricas.

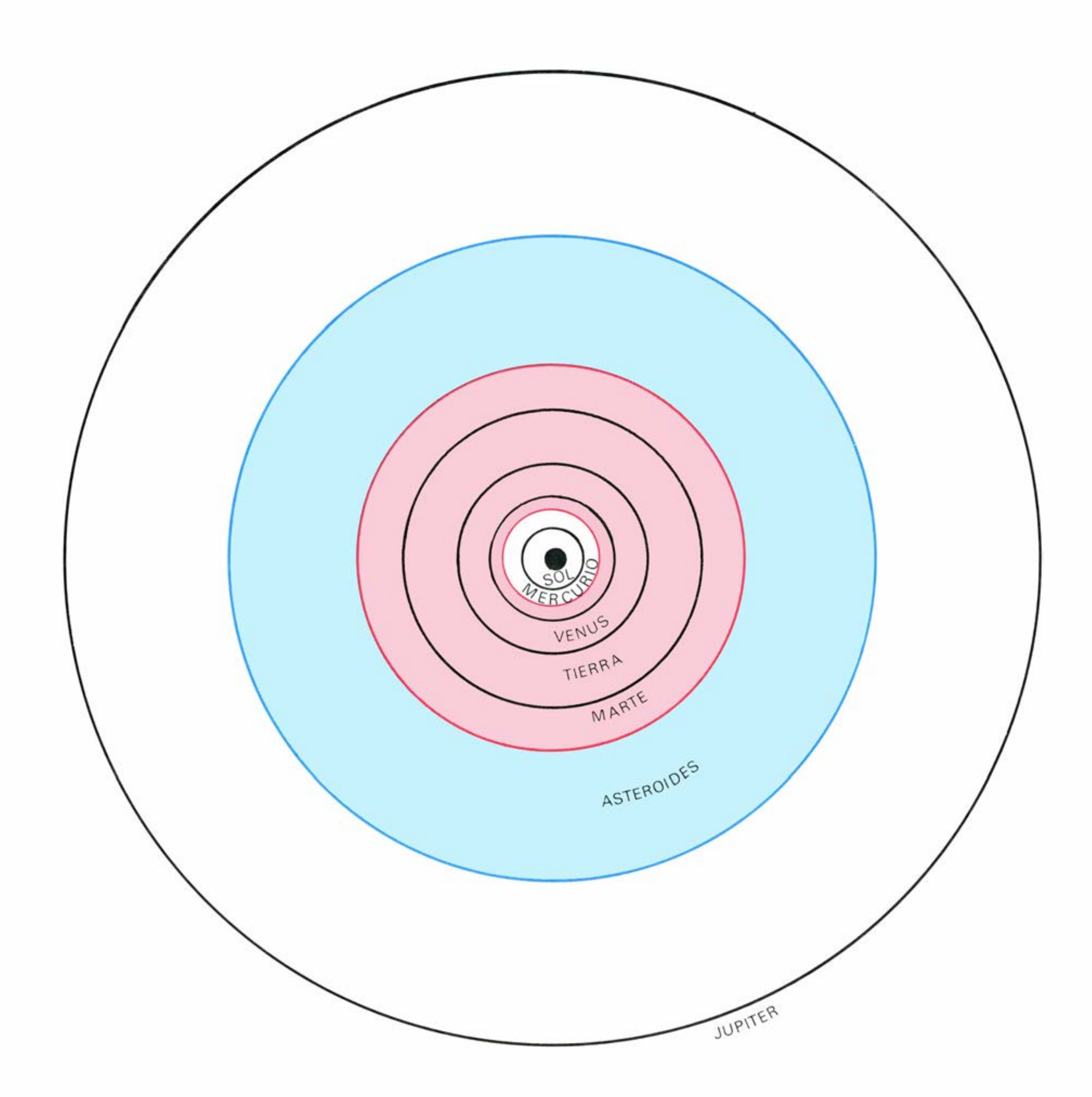
Para obtener la función media de esparcimiento hay que promediar las funciones de esparcimiento atribuidas a las distintas partículas con la correspondiente distribución de tallas. De acuerdo con estas funciones medias hay tres tipos de modelos que actualmente se consideran mejores para explicar la luz zodiacal. Primero, los modelos de partículas Rayleigh basados en la polarización positiva de las partículas de pequeño tamaño. En este caso incluso valen mezclas de partículas que sólo sean dieléctricas. El problema que presenta este tamaño de granos es que a pesar de no ser barridos del sistema solar por presión de radiación, existen fuerzas que limitan su tiempo de vida y no pueden explicar el color observado. La segunda clase de modelos son los de grandes partículas metálicas, en los cuales, para explicar el máximo de polarización entre sesenta y setenta grados de elongación, hay que suponerlas mezcladas con partículas absorbentes de talla mayor que las del modelo Rayleigh. Estas no presentan polarización positiva para ángulos pequeños y contrarrestan la excesiva polarización de las partículas metálicas a esas elongaciones. Para conseguir este efecto, la densidad de las partículas dieléctricas debe caer más rápidamente que la de las metálicas con la distancia al sol. Los modelos del tercer tipo están formados por partículas grandes débilmente absorbentes. Como en el anterior, hay que suponerlas mezcladas con partículas dieléctricas y atribuirles diferentes leyes de distribución espacial para explicar el máximo de polarización.

Sin embargo, este panorama puede cambiar disponiendo de mediciones de

luminancia y polarización hechas desde el espacio, ya que con estos datos y escribiendo la ecuación que da la luminancia en forma diferencial, se puede llegar a deducir las funciones medias de esparcimiento locales y densidad de partículas.

Nosotros estamos trabajando en esta línea, convencidos de sus posibilidades. Hemos llegado a la conclusión de que la importancia de este método radica en que, disponiendo de abundantes medidas para diferentes distancias al sol, no hay que hacer ninguna hipótesis sobre las dos funciones fundamentales n y σ. Si conocemos la luminancia como función de la distancia heliocéntrica y de la elongación al sol, mediante un sencillo cálculo se puede obtener una función J que da la luz esparcida por cada unidad de volumen del medio interplanetario y esta función nos provee toda la información necesaria sobre n y σ, sin necesidad de hacer ninguna hipótesis adicional. La función J en cada punto de la nube es igual a la función local de esparcimiento multiplicada por un factor que depende del punto. El factor multiplicador, si nos limitamos al plano de simetría de la nube, es función de la distancia del sol. De esta manera, si el esparcimiento es independiente de esta distancia, dicho factor dará la distribución espacial del polvo zodiacal. Además, este resultado señalará que la composición de la nube es la misma en cualquiera de sus puntos, variando sólo su densidad local. Para conocer la composición bastará recurrir, como en los modelos a priori, a calcular la función media de esparcimiento a partir de las funciones de esparcimiento conocidas de diferentes tipos de partículas. De esta forma, las propiedades físicas de los granos quedarán definidas.

En el caso de que σ dependa de la distancia heliocéntrica, el problema es básicamente el mismo, sólo que el cálculo se complica. Ahora la composi-



VISION DE LA NUBE desde el polo del plano invariable del sistema solar. En rojo, se ha representado la región por donde se extiende la nube y, en azul, la región donde se sitúa el cinturón de asteroides. En negro, están señaladas las órbitas de los planetas hasta Júpiter. Puede observarse que el polvo responsable de la luz zodiacal es inexistente en las proximidades del sol; casi todo está concentrado en una corona circular cuyo radio vale alrededor de 2 unidades astronómicas. Una unidad astronómica es la distancia media del sol a la tierra.

ción del medio varía de un punto a otro de la nube y, por lo tanto, habrá que repetir el cálculo anterior para cada distancia heliocéntrica con objeto de obtener la función densidad local para cada tipo de partículas *(véase la ilustración de la página anterior)*.

Utilizando las componentes polarizadas, sin embargo, se obtendrá la luz polarizada esparcida por unidad de volumen y, por tanto, se podrá definir un grado de polarización local, el cual permitirá seleccionar la naturaleza de las partículas que pueden formar parte del modelo.

Nuestra descripción de los resultados observacionales hecha anteriormente, distribución de luminancias y polarizaciones independiente del tiempo, podría hacer pensar que la nube micrometeoroidea es inmóvil y permanente. Nada más alejado de la realidad: los granos describen órbitas en torno al sol. Sobre la misma luz zodiacal se pone de manifiesto el movimiento de los pobladores del medio interplanetario al poder medirse sobre ella corrimientos Doppler en la luz solar esparcida. Este tipo de mediciones, aún muy escasas, parece evidenciar un desplazamiento hacia el rojo, lo que hace suponer que el movimiento de las partículas tiene el mismo sentido que el de los planetas.

Lo relativo a la dinámica de los granos, tratado sólo teóricamente, a falta de resultados experimentales adecuados, tiene en la actualidad demasiados problemas abiertos.

Hay razones suficientes (efecto fotoeléctrico, viento solar) para pensar que el polvo zodiacal está cargado. Si los granos zodiacales estuviesen sometidos sólo al influjo gravitatorio describirían perfectas órbitas keplerianas perturbadas tan sólo por las atracciones planetarias. La realidad resulta bastante más compleja, pues son varias las fuerzas que entran en juego. Una relación somera de ellas es la siguiente: 1) La "presión de radiación" que se manifiesta como una fuerza que actúa en la dirección del vector de Poynting, radial desde el sol y hacia fuera. 2) El "efecto Poynting-Robertson" produce una fuerza resistiva proporcional a la velocidad tangencial de la partícula. 3) De la interacción electroestática entre el plasma solar ionizado y las partículas cargadas se sigue también una fuerza de frenado. 4) La existencia de un campo magnético interplanetario origina una fuerza que tiende a aumentar la inclinación de las órbitas de los micrometeoroides (componente radical) y otra segunda fuerza de consecuencias análogas al así denominado efecto Poynting-Robertson (que es la componente polar).

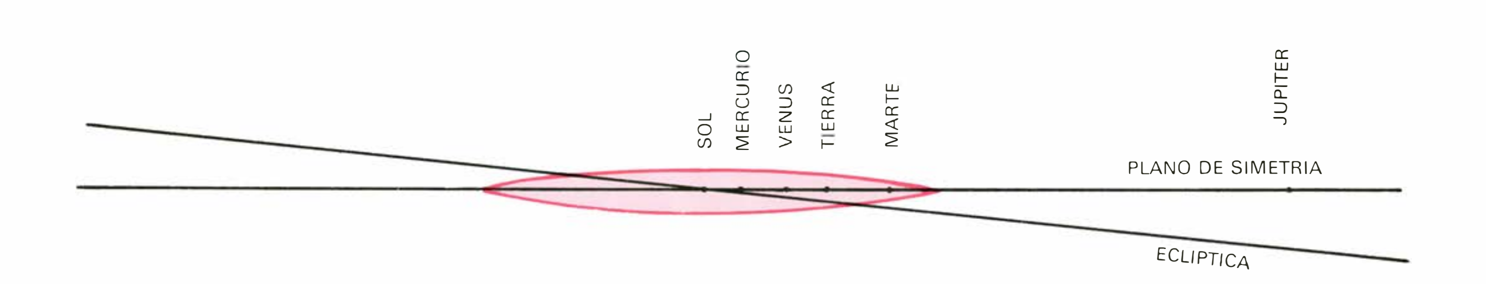
Por una serie de investigadores se ha calculado la vida media en el sistema solar de los granos interplanetarios, como consecuencia de cada una de estas fuerzas (consideradas separadamente). Para ciertos tamaños, algunos de estos procesos reducirían su permanencia en el sistema solar a tiempos inferiores al año. Pero aún los lentos efectos gravitatorios, actuando durante la vida del sistema solar ($> 5 \times 10^9$ años) habrían sido capaces de limpiar de polvo cósmico el espacio interplanetario, en este largo espacio de tiempo. Pero la existencia de la luz zodiacal y su luminancia globalmente constante hacen imprescindible la existencia de eficaces "procesos de inyección" de polvo.

Los procesos propuestos para mantener la nube zodiacal son: a) desintegración cometaria; b) fraccionamiento colisional de asteroides; c) captura solar de granos interestelares, y d) condensación del gas interplanetario.

La conclusión final de lo expuesto es clara: la materia micrometeoroidea en el sistema solar no puede ser permanente y estable. La constancia global observada en la luz zodiacal tiene que ser el resultado de un equilibrio dinámico en la densidad espacial del polvo interplanetario.

Se admite que las diferencias entre los datos de luminancia y polarización dadas por diferentes autores son debidas a las diferentes técnicas de descontaminación usadas, errores en el calibrado de los aparatos, e, incluso, a las diferentes posiciones de la tierra en su órbita. Sin embargo, mediciones recientes más precisas fuerzan a aceptar que la luz zodiacal pueda experimentar variaciones rápidas, que podrían ser debidas, entre otras causas, a la actividad solar y al paso de cometas por la nube. Las fulguraciones cromosféricas solares inducen los cambios más violentos en el medio interplanetario. Estudiando el efecto que producen sobre la dinámica de los granos interplanetarios se llega a la conclusión de que cualquiera que sea la naturaleza de éstos, si tienen un tamaño inferior a media micra, sus órbitas son perturbadas pasando de elípticas a parabólicas o hiperbólicas, siendo expulsados del sistema solar.

De forma esquemática, podemos imaginar a la nube micrometeoroidea sometida a dos tipos de procesos contrarios: los que tienden a disminuirla (procesos de limpieza) y los que tienden a incrementarla (procesos de inyección). Una imagen simple del efecto de los procesos de inyección y de limpieza que actúan sobre la nube zodiacal es la formación de "estelas" o "cicatrices" (zona con densidad alterada), que, durante



CORTE TRANSVERSAL de la nube, donde se pone de manifiesto su pequeño espesor. Se piensa que el máximo espesor es menor que el radio de la órbita de Mercurio. También se ha representado el plano de la eclíptica, que forma un ángulo de 1,6° con el plano invariable del sistema solar y la situación de las órbitas de los planetas. Debido a la forma de la nube las medidas de luz zodiacal decrecen rápidamente cuando la dirección de observación se separa del plano de simetría de la misma. La eclíptica se define como la trayectoria aparente del sol en la bóveda celeste.

cierto tiempo, es como transportada por la propia nube en su movimiento alrededor del sol.

El aspecto de la luz zodiacal ha hecho que el tema de su simetría se haya tratado desde muy antiguo. Mediciones recientes específicas sobre todo el cielo evidencian que es simétrica respecto de un plano en el que justamente se encuentran los valores de máxima luminancia. Todos los resultados experimentales de que se dispone, también los procedentes de sondas espaciales, manifiestan una distribución heliocéntrica del polvo interplanetario. Sin embargo, parece razonable esperar que la influencia gravitacional de los grandes planetas del sistema solar, como Júpiter y Saturno, influyan en ella, haciendo que tenga un plano de simetría que coincida con el plano invariable del sistema solar o "plano del máximo de Aries" de Laplace. Mediciones cuidadosas de luminancia señalan que su plano de simetría coincide con aquél. La inclinación del plano invariable del sistema solar sobre la eclíptica es de alrededor de un grado y treinta y seis minutos, y la encontrada experimentalmente para la luz zodiacal es de menos de dos grados; lo cual parece probar dentro de los errores experimentales, la coincidencia de ambos planos. Los valores de las mediciones hechas para direcciones de observación que se alejan del plano de simetría y se aproximan al polo de la eclíptica (dirección perpendicular al plano de la eclíptica) decrecen rápidamente, lo que pone de manifiesto que casi todos los granos están concentrados en las inmediaciones de dicho plano; cosa que por otra parte era de esperar, ya que toda la materia del sistema solar está concentrada en torno a él.

La nube micrometeoroidea tiene además simetría acimutal respecto a un eje que pasa por el sol y es perpendicular al plano invariable del sistema solar. Se manifiesta en que las mediciones de luminancias hechas en este plano entre 30° y 330° de elongación al sol son simétricas respecto de 180°. Por esta razón son superponibles las mediciones correspondientes al llamado cono de tarde, intervalo de elongaciones entre 30° y 180°; y las del cono de mañana, intervalo de elongaciones entre 180° y 330°.

También se ha especulado con la posibilidad de que exista una nube geocéntrica cuyo límite estuviera a una distancia de la tierra igual al radio de la órbita de la luna. Pero no hay pruebas observacionales que apoyen esta hipótesis. Las experiencias que podrían apoyarla, las observaciones de luz zodiacal a pequeñas elongaciones de la luna y a grandes elongaciones hechas desde el *Pioneer 10,* están cuantitativamente de acuerdo con las realizadas desde la tierra. Por lo que, si existe dicha nube geocéntrica, es tan débil que su contribución a la luz zodiacal es despreciable.

Antes de concluir este artículo de puesta al día sobre la luz zodiacal, en el que se ha tratado de exponer lo que se sabe, lo que se ignora y dónde están las direcciones de investigación más prometedoras, parece muy conveniente dar una síntesis global esquemática.

El espacio interplanetario no está vacío, desde luego, aunque sí bastante enrarecido. El recorrido libre medio de una molécula antes de chocar con otra es de muchos kilómetros. A ese espacio lo llena el plasma solar que está continuamente manando de Nuestra Estrella. Está surcado por un numerosísimo enjambre de partículas cargadas, sobre todo microscópicas (los micrometeoroides) que describen órbitas keplerianas, como los grandes planetas. Los cometas, asteroides y meteoroides juntos representan sólo el 1 por ciento, aproximadamente, de la masa del medio interplanetario.

La gran nube micrometeoroidea o nube zodiacal debe tener forma lenticular muy aplastada, con un plano de simetría principal que coincide con el "plano invariable de sistema solar". Su densidad parece dejar de ser notable más allá de dos unidades astronómicas. En las cercanías del sol los granos son volatilizados, por lo cual parece razonable considerar sin ellos una esfera centrada en el sol y de alrededor de media unidad astronómica.

Tanto las observaciones de luz zodiacal hechas desde tierra como las realizadas sobre sondas espaciales profundas conducen a considerar que la cantidad de granos por unidad de volumen varía según $r^{-\beta}$, siendo r la distancia al sol y, β, un parámetro cuyo valor es alrededor de la unidad. O sea, que la densidad decrece de forma inversamente proporcional a la distancia al sol.

Si bien habrá partículas con toda la gama de tamaños a partir del de los meteoroides, las causantes de la luz zodiacal y que constituyen las más abundantes en el espacio interplanetario deben tener un tamaño del orden de magnitud de la micra. Hay bastante acuerdo en considerar como función de tamaño α^{-k}, donde α es el parámetro de talla y k una constante cuyo valor es 2.

La naturaleza de las partículas sigue siendo un problema no resuelto. Se ha tratado de determinar a través de la función de esparcimiento, utilizando la teoría de Mie para esferas o figuras geométricas sencillas. Las muestras traídas por las trampas situadas en los vehículos espaciales muestran ejemplares de aspecto muy irregular, como lógicamente puede pensarse, estando sometidos durante su permanencia en el espacio interplanetario a procesos de abrasión. Consecuentemente no parece muy buena la vía de la teoría de Mie. Muchos argumentos apuntan hacia una naturaleza rocosa con una base química de silicatos. Entre ellos se deben citar la emisión infrarroja encontrada en las cercanías del sol; la existencia del gegenschein, como efecto óptico que exige un esparcimiento de la luz solar por partículas predominantemente dieléctricas; el Al^{26} contenido en los sedimentos marinos profundos que sólo puede ser explicado situando su origen en silicatos provenientes de material interplanetario.

La posible relación existente entre polvo interplanetario y polvo interestelar resultaba muy problemática de aceptar debido a las dispares propiedades ópticas encontradas en ambos. Se acaba de señalar que el exceso de ultravioleta que presenta la luz zodiacal entre 1600 Å y 2200 Å está correlacionado con un decrecimiento de la absorción interestelar en esta misma zona del espectro electromagnético, lo que abre una esperanzadora puerta a este problema.

Pese a la estabilidad global de la nube zodiacal puede imaginarse la misma surcada por "estelas" o "cicatrices" producidas por los procesos de inyección o de limpieza, los cuales tienden a rellenarse por efecto de las contrapuestas fuerzas y procesos físicos a que están sometidos los granos interplanetarios.

Desgraciadamente, en este resumen final poco se puede decir del origen del polvo interplanetario, así como del papel que desempeña en el proceso evolutivo general del sistema solar. Para algunos, el polvo zodiacal es el residuo de la nebulosa protoplanetaria, otros piensan en polvo interestelar captado por el sistema solar a su paso reciente a través de una nube galáctica; hay quienes pretenden explicarlo por desintegración cometaria y fraccionamiento de asteroides en choques sucesivos. Finalmente, se ha sugerido un origen solar o por condensación del plasma interplantario. Proliferan las hipótesis, pero juzgamos que las teorías se mueven todavía en la pura especulación. Se precisan datos experimentales bien dirigidos a resolver este excitante problema.

Juegos matemáticos

Inesperadamente, al acorralar la dama se llega a recovecos de la teoría de números

Martin Gardner

Un análisis de un sencillo juego bipersonal puede conducir hasta rincones fascinantes de la teoría de números. Comenzamos este mes con un precioso y casi desconocido juego que se practica con un tablero de ajedrez y una dama. Antes de terminar habremos examinado un notable par de sucesiones numéricas, íntimamente relacionadas con la razón áurea y las sucesiones de Fibonacci generalizadas.

El juego, que no tiene nombre tradicional, fue inventado hace unos 17 años por Rufus P. Isaacs, matemático de la Universidad Johns Hopkins. Lo llamaremos "acorralar la dama".

El jugador *A* sitúa una dama en cualquiera de las casillas de la fila y columna que definen el ángulo superior derecho del tablero; son las casillas grises de la ilustración de esta página. La dama se mueve del modo habitual, pero tan sólo hacia el sur, oeste o suroeste. El jugador *B* mueve primero; los jugadores actúan después alternativamente. Gana el juego quien consiga conducir la dama hasta la casilla señalada con el asterisco.

Es imposible empatar; por tanto, *A* o *B* habrán de vencer si ambos bandos juegan racionalmente. Es fácil programar la calculadora impresora HP-97, o la de bolsillo HP-67, para que ejecuten una partida perfecta. De hecho, el programa necesario se suministra en tarjeta magnética junto con el libro *HP-67/HP-97 Games Pac 1,* recientemente editado por Hewlett-Packard.

Isaacs construyó una estrategia ganadora para acorralar la dama en tableros de extensión ilimitada, empezando en la casilla-asterisco, y razonando a la inversa. Si la dama se encuentra en la fila, columna o diagonal de la casilla-asterisco, el jugador de turno puede ganar inmediatamente. Se tachan todas estas casillas con tres líneas rectas, como se indica en la parte *a* de la figura superior de la página 102. Obviamente, las dos casillas de color son "seguras", en el sentido de que, si se ocupa una de ellas, el adversario está obligado a mover hacia una posición que nos dará la victoria llegado nuestro turno.

La parte *b* de la figura expone el paso siguiente de nuestro razonamiento recursivo. Se añaden seis líneas rectas que tachen todas las filas, columnas y diagonales convergentes en las dos casillas seguras recién descubiertas. Procediendo así, podemos colorear dos casillas seguras más, como se muestra. Si se ocupa una cualquiera de ellas, el contrario está obligado a mover, con lo que en el próximo turno propio se puede, bien ganar ya, bien alcanzar una de las casillas seguras más cercanas al asterisco.

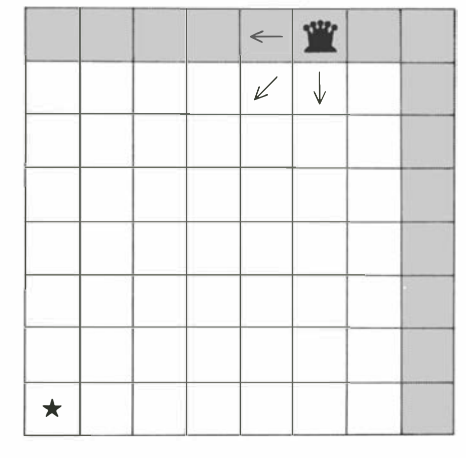
Iterando este procedimiento, conforme a la parte *c* de la figura, se completa el análisis del juego en un tablero de ajedrez, hallándose un tercer par de casillas seguras. Ahora ya es evidente que el jugador *A* puede ganar siempre situando la dama en los cuadros coloreados de la fila superior o de la columna del borde derecho del tablero. A partir de ahí, su estrategia consiste, simplemente, en mover a otra casilla segura, lo que siempre le es posible. Si *A* no sitúa la dama en una casilla segura, *B* puede ganar siempre, moviendo hacia la casilla segura y repitiendo la estrategia anterior. Obsérvese que la sucesión de jugadas necesarias para ganar no es necesariamente única. Hay ocasiones en las que el vencedor seguro tiene dos opciones; una puede apresurar la victoria, la otra, demorarla.

Nuestro análisis recursivo puede generalizarse a matrices de cualquier forma y tamaño. En la ilustración de la página 102, abajo, se han coloreado todos los cuadros seguros de un cuadrado de 25 casillas de lado. Obsérvese que están simétricamente apareadas respecto de la diagonal principal, y que se encuentran, casi, sobre dos rectas divergentes hacia el infinito. Su situación sobre estas rectas es curiosamente irregular. ¿Existen fórmulas que expresen su posición, sin tener que proceder por recurrencia?

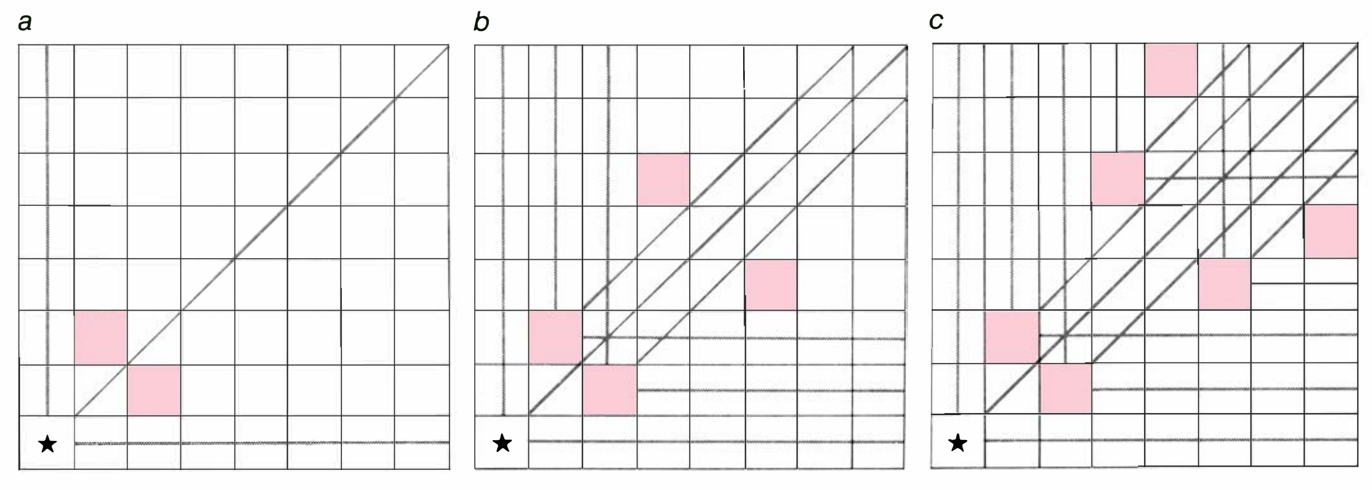
Antes de responder, volvamos nuestra atención hacia un antiguo juego, consistente en ir retirando cuentas, del que se dice que estuvo en boga en China con el nombre de *tsyan-shidzi,* que significa "elegir piedrecitas". El juego fue reinventado por el matemático holandés W. A. Wythoff, quien publicó su análisis en 1907. En la matemática occidental se conoce por "nim de Wythoff".

El juego requiere dos montones de cuentas o fichas; cada montón tiene un número arbitrario de cuentas. Al igual que en el nim, cada jugada consiste en retirar cierto número de cuentas de uno de los montones. Es obligatorio retirar por lo menos una. Si se desea, puede retirarse un montón completo. A diferencia del nim, se puede tomar fichas de ambos montones, a condición de retirar la misma cantidad de ambas pilas. El jugador que retira la última ficha gana la partida. Si ambos montones tienen el mismo número de cuentas, el jugador de turno gana inmediatamente, tomando ambos. Por esta razón, el juego resulta trivial si se comienza con montones iguales.

Ya estamos preparados para la primera sorpresa. ¡El nim de Wythoff es isomorfo a la "dama acorralada"! Cuando Isaacs inventó el juego no conocía el nim de Wythoff, y quedó admirado al enterarse de que su juego había sido re-



Juego de acorralamiento de R. P. Isaacs



Análisis recursivo de "acorralar la dama"

Los primeros nueve pares de casillas seguras

suelto ya en 1907. El isomorfismo es fácil de ver. Como se muestra en la figura del cuadrado de 25 casillas de lado, se numeran las 25 columnas a lo largo del eje de abscisas, x, de 0 en adelante; y análogamente se numeran las filas a lo largo del eje de ordenadas, y. A cada celdilla puede ahora dársele un número x/y. Estos números corresponden al número de cuentas de los montones x e y. Cuando se mueve la dama hacia el oeste, disminuye el montón x. Cuando la dama se desplaza hacia el sur, disminuye el montón y. Cuando se mueve diagonalmente hacia el suroeste, ambos montones pierden la misma cantidad. Mover la dama hasta la casilla 0/0 equivale a reducir ambos montones a 0.

La estrategia para ganar el nim de Wythoff consiste en reducir los montones a un par de números correspondientes a una celdilla segura del juego de dama. Si los números iniciales de los montones forman un par seguro, el primer jugador pierde. Al jugar, dejará un par no seguro, que su oponente siempre puede reducir a par seguro en la próxima jugada. Si el juego comienza con un par no seguro, el primer jugador puede ganar siempre, reduciendo los montones a par seguro, y jugando posteriormente tan sólo pares seguros.

El orden relativo de los números de un par seguro carece de importancia. Esta propiedad traduce la simetría de las casillas seguras respecto de la diagonal principal del tablero: sus coordenadas tienen los mismos números, pero en orden inverso. Tomemos sucesivamente los pares seguros, comenzando por el más próximo a 0/0, y dispongámoslos en fila, poniendo siempre el menor de los números de cada par en el numerador, y, el mayor, en el denominador, como se indica en la figura de la parte superior de esta página. Encima de cada par se escribe su "número de posición". Los numeradores de los pares seguros forman una sucesión que llamaremos A; los denominadores, otra, que llamaremos B.

Estas dos sucesiones son estrictamente crecientes, y poseen tantas propiedades que sobre ellas se han escrito docenas de artículos especializados. Obsérvese que cada número B es suma de su correspondiente número A y su número de posición. Si se suman un número A y un número B, resulta un número A que tiene en esta sucesión su número de posición igual a B. (Por ejemplo, $8+13=21$. El 13-avo número de A es 21.)

Hemos visto que las dos sucesiones anteriores se obtienen geométricamente, trazando rectas en el tablero y coloreando ciertas casillas, según un algoritmo recursivo. ¿Se podría generar dichas sucesiones mediante un algoritmo recursivo puramente numérico?

POSICION (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A. $[n\phi]$	1	3	4	6	8	9	11	12	14	16	17	19	21	22	24
B. $[n\phi^2]$	2	5	7	10	13	15	18	20	23	26	28	31	34	36	39

Los primeros 15 pares seguros del nim de W. A. Wythoff

Sí. Empecemos tomando 1 como numerador del primer par seguro. Sumándolo con su número de posición se obtiene que el denominador es 2. El numerador del próximo par es el mínimo entero positivo no usado todavía. Es 3. Su denominador será 5, que es la suma de 3 con el número de posición. Como numerador del par siguiente se toma otra vez el mínimo entero aún no utilizado. Es 4. Su denominador es 7, suma de 4 y 3. Continuando de este modo se obtienen las sucesiones A y B.

Más aún, hemos descubierto una de las más insólitas propiedades de los pares seguros. Es obvio, en virtud del proceso seguido, que todo entero positivo ha de figurar una, y solamente una vez, en alguna de las dos sucesiones.

¿Existe algún método no recursivo para engendrar las sucesiones? Sí lo hay. Wythoff fue el primero en descubrir que los números de la sucesión A se obtienen ¡redondeando a entero por defecto los múltiplos de la razón áurea! (El mismo confiesa que hizo el descubrimiento "sacándoselo de la manga".)

La razón áurea, como saben la mayoría de los lectores, es uno de los más famosos números irracionales. Al igual que el número pi, acostumbra a presentarse en los lugares más insólitos. Los matemáticos de la Grecia antigua lo llamaban "razón media y extrema", por el siguiente motivo: al dividir un segmento rectilíneo dado en dos partes A y B, de modo que la razón de la longitud de A a la de B sea igual a la razón de todo el segmento al segmento A, se obtiene la sección áurea del segmento dado. La creencia, ampliamente difundida, de que la sección áurea de un segmento constituye su descomposición más armoniosa, ha originado una voluminosa literatura (en su mayor parte gratuita) acerca de la importancia de la sección áurea en pintura y arquitectura.

Puede calcularse la razón áurea asignándole longitud 1 al segmento B. Nuestro método de división del segmento se expresa mediante $(A+1)/A=A/1$, sencilla ecuación de segundo grado que tiene la raíz positiva $A=(1+\sqrt{5})/2= =1{,}61803398...$ que es la razón áurea. Su recíproca es 0,61803398... La razón áurea es el único número positivo al cual, al restarle 1, se convierte en su recíproco. En Gran Bretaña, la razón áurea suele denotarse τ (tau), pero en otros sitios acostumbra a denotarse Φ (phi), y así lo haremos aquí.

Los números de la sucesión A vienen dados por la fórmula $[n\,\Phi]$, donde n es el número de posición y los corchetes indican que debe despreciarse la parte decimal. Los números de la sucesión B pueden obtenerse sumando los de A con sus números de posición, pero resulta más conveniente expresarlos como resultado de redondear a entero por defecto los múltiplos del cuadrado de phi. El término general de B es, así pues, $[n\Phi^2]$.

El hecho de que cada número entero positivo aparezca una y solamente una vez en los pares seguros puede enunciarse mediante el importante teorema siguiente: El conjunto de enteros comprendidos entre dos múltiplos sucesivos de phi y entre dos múltiplos consecutivos del cuadrado de phi es precisamente el conjunto de los números naturales.

Dos sucesiones crecientes de enteros positivos que conjuntamente contengan una vez a cada entero positivo se llaman sucesiones "complementarias". No es phi el único número irracional que genera tales sucesiones, aunque sí es el único que produce los pares seguros del nim de Wythoff. En 1926, Sam Beatty, matemático canadiense, publicó su asombroso hallazgo de que todo número irracional positivo engendra sucesiones complementarias.

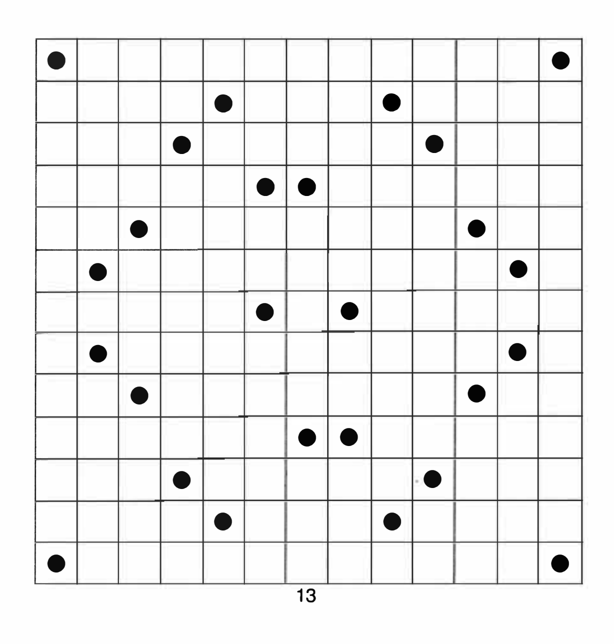
Sea k un número irracional. La sucesión A está formada por todos los múltiplos de k, redondeados por defecto, o sea, $[nk]$, donde n es el número de posición y los corchetes indican que se desprecia la parte decimal. La sucesión B está formada por los redondeos, por defecto, de los múltiplos de $k/(k-1)$, o sea, $[nk/(k-1)]$. Las sucesiones complementarias así obtenidas se llaman sucesiones de Beatty. Si k es el número phi, la segunda fórmula da los redondeos, por defecto, de los múltiplos de $1{,}618+/0{,}618+ =2{,}618+$, que, debido al antojadizo carácter de phi, es el cuadrado de phi. A los lectores podría gustarles comprobar que realmente las fórmulas de Beat-

ty producen sucesiones complementarias; para ello puede tomarse $k=\sqrt{2}$, pi, *e*, o cualquier otro número irracional. También puede verse que, dando a *k* valores racionales, no se obtienen sucesiones complementarias.

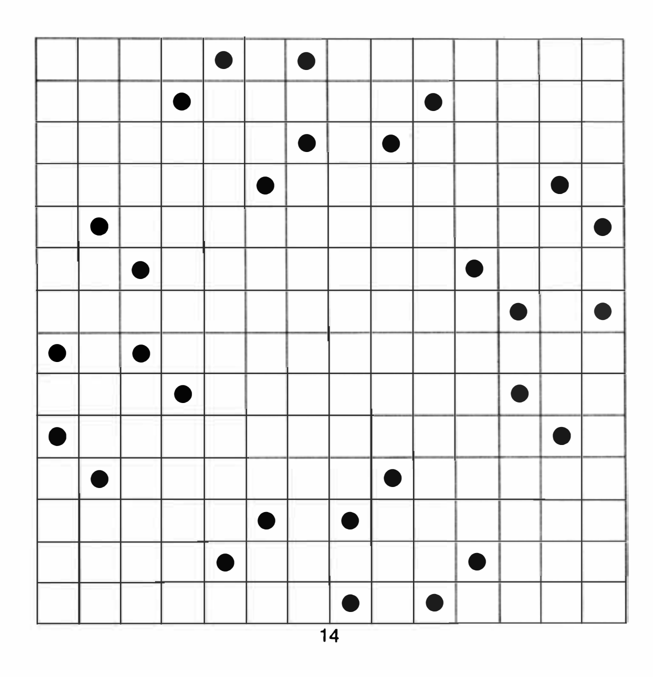
Siempre que aparece la razón áurea, puede apostarse a que por el contorno merodean los números de Fibonacci. La sucesión de Fibonacci es 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34,... En ella, cada número, excepto los dos primeros, es suma de los dos precedentes. Las sucesiones de Fibonacci generalizadas tienen la misma propiedad, pero pueden comenzar por dos números cualesquiera. Todas las sucesiones de Fibonacci tienen la propiedad de que el cociente de dos términos adyacentes se acerca más y más a phi, y tiende, en el límite, a la razón áurea.

Agrupando por pares los términos de la sucesión de Fibonacci 1/2, 3/5, 8/13, 21/34,... puede verse que todo par de Fibonacci es un par seguro del nim de Wythoff. El primero de los pares seguros que no figura en la sucesión anterior es 4/7. No obstante, construyendo otra sucesión de Fibonacci a partir de 4/7, y agrupándola por pares, se obtiene 4/7, 11/18, 29/47... que también son pares seguros del nim de Wythoff. En realidad, estos pares pertenecen a una sucesión de Fibonacci especial, la de los llamados números de Lucas, que comienza 2, 1, 3, 4, 7, 11...

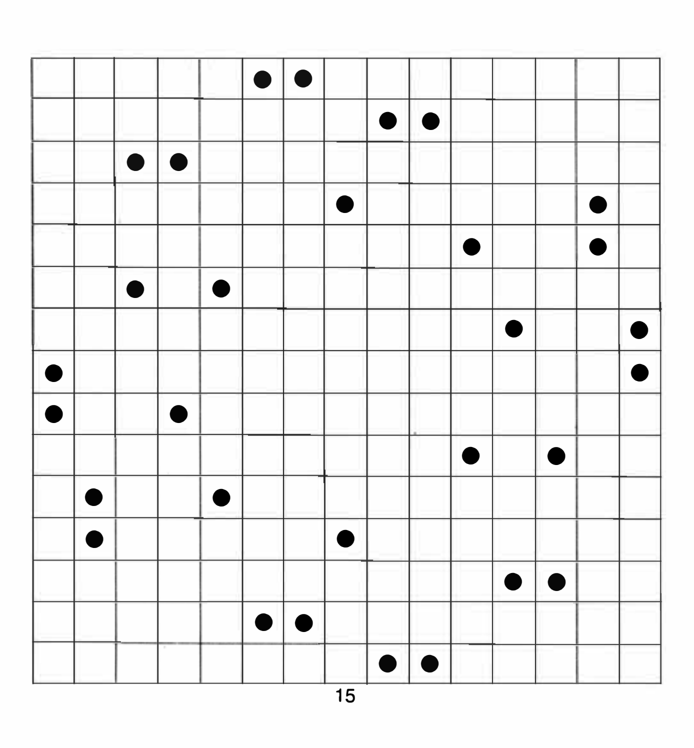
Imaginemos que vamos repasando la sucesión infinita de pares seguros (como se hace la criba de Eratóstenes para separar los números primos), y tachamos el conjunto infinito de pares seguros pertenecientes a la sucesión de Fibonacci. El mínimo de par no tachado es 4/7. Podemos tachar ahora un segundo conjunto infinito de pares seguros, a partir de 4/7, pertenecientes a la sucesión de Lu-



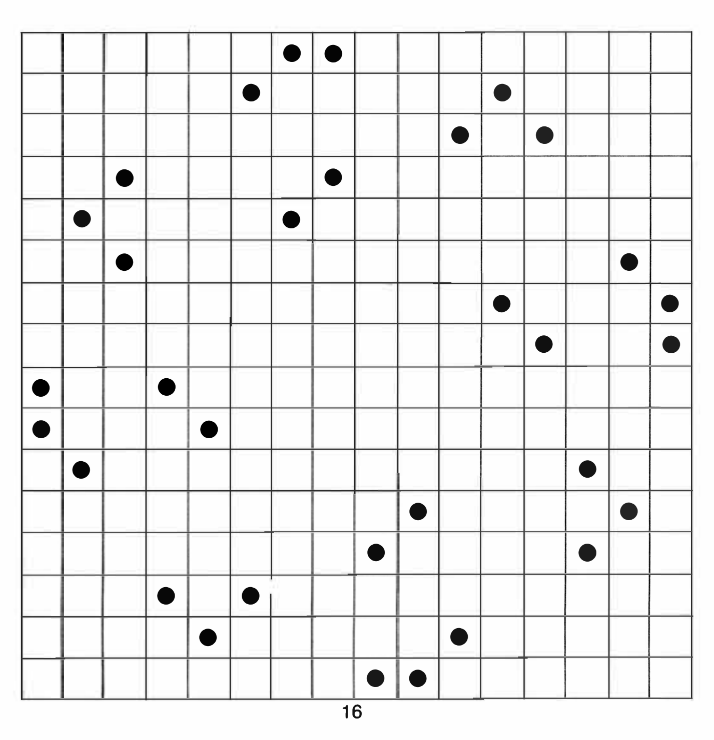
13



14



15



16

Nuevas soluciones del problema "nunca tres en raya"

cas. Todavía resta un conjunto infinito de pares seguros, de los cuales el más bajo es 6/10. Este par engendra otra sucesión de Fibonacci, cuyos pares son todos seguros. El proceso continúa indefinidamente. Robert Silber, matemático de la North Carolina State University, llama "primitivos" a los pares seguros que engendran nuevas sucesiones de Fibonacci, y demuestra que existe una infinidad de pares primitivos que resultan ser también seguros.

Como todo entero positivo aparece exactamente una vez en la sucesión de pares seguros, Silber concluye que hay una sucesión infinita de sucesiones de Fibonacci que recubre exactamente al conjunto de los números naturales.

Tomemos ordenadamente los pares primitivos 1/2, 4/7, 6/10, 9/15... y anotemos sus números de orden 1, 3, 4, 6... ¿No resulta familiar esta sucesión? Como demuestra Silber, no es otra cosa que la sucesión *A*. Con otras palabras, un par seguro es primitivo si, y solamente si, su número de posición pertenece a la sucesión *A*.

Supongamos que se está practicando el juego de Wythoff con un número enorme de cuentas, o que el tablero es de proporciones gigantescas. ¿Cuál es el método óptimo para decidir si una posición es segura o no, y cómo realizar una partida perfecta, suponiendo que se lleven las de ganar?

Evidentemente, podría usarse la fórmula $[n\Phi]$ para obtener una tabla suficientemente grande de pares seguros; pero, sin auxilio de una calculadora, sería un trabajo muy pesado. ¿No habrá un método más sencillo, como pasa en el nim, donde escribiendo en base dos el número de piezas de cada montón se pueda usar una técnica perfecta? Pues sí, lo hay, pero exige utilizar una representación bastante curiosa de los números, llamada notación de Fibonacci, que ha sido intensamente estudiada por Silber y su colega Ralph Gellar, y también por otros matemáticos, como, por ejemplo, Leonard Carlitz.

Se escribe la sucesión de Fibonacci de derecha a izquierda, como se muestra en la ilustración de arriba. Sobre ella se escriben los números de posición, también de derecha a izquierda. Con ayuda de esta tabla podemos expresar unívocamente todo entero positivo como suma de números de Fibonacci. Supongamos que se desee escribir 17 en notación de Fibonacci. Se busca el máximo número de Fibonacci menor que 17 (es 13) y se pone un 1 bajo él. Moviéndonos hacia la derecha, buscamos el primer número que sumado con 13 no dé más de 17. Es 3, y, en consecuencia, pondremos un 1 bajo él. Moviéndonos hacia la derecha otra vez, vemos que habrá que asignar un 1 al 1 que ocupa la segunda posición en la sucesión. A los números de Fibonacci no utilizados se les asigna 0.

Resulta de este modo 1001010, que representa unívocamente al 17. Para traducirlo otra vez a notación decimal, se suman los números de Fibonacci indicados por las posiciones de los unos: $13+3+1=17$. El 1 situado en el extremo derecho de la sucesión nunca se usa, por lo que en notación de Fibonacci todos los números terminan en 0. También se comprende fácilmente que nunca habrá dos unos adyacentes. Si los hubiese, su suma sería igual al número de Fibonacci siguiente hacia la izquierda, y, de acuerdo con nuestras reglas, a tal número se le asignaría un 1, y, a los dos a su derecha, sendos 0.

En notación de Fibonacci, para expresar la suma de los miembros de un par seguro basta añadir un cero a la derecha del número *B*. Resulta así que la sucesión de Fibonacci se obtiene comenzando por 10 y añadiendo ceros: 10, 100, 1000, 10000... El mismo proceso da la sucesión de Fibonacci generada por un par primitivo. Por ejemplo, la sucesión de Lucas, que comienza por 4/7, es 1010, 10100, 101000, 1010000...

Al describir en notación de Fibonacci un número de la sucesión *A*, la cifra 1 que ocupe la posición más alejada hacia la derecha se encuentra en lugar par (contando de derecha a izquierda). Todo número *B* se obtiene añadiendo un cero a la derecha de su compañero *A*. Por consiguiente, la cifra 1 más alejada hacia la derecha de un número de la sucesión *B* ocupa lugar impar. Como todo número cardinal pertenece, bien a *A*, bien a *B*, tenemos un sencillo método para decidir si una determinada posición del nim de Wythoff es segura o no. Se escriben los números en notación de Fibonacci. Si el menor de ellos es un número *A*, y si añadiéndole un cero se obtiene el otro número, la posición es segura; de lo contrario, no lo es.

Para ejemplificar el método puede servirnos $8/13 = 100000/1000000$. El 1 de 100000 está en sexta posición, que es par, por lo que 100000 es un número *A*. Añadiéndole un 0 se obtiene 1000000 $=13$, compañero de 8. Sabemos que 8/13 es un par seguro. Si es el turno propio, el oponente lleva las de ganar. Si hay esperanza de que no sepa jugar a la perfección, se hace un pequeño movimiento al azar, a ver si pronto comete un error.

Si el par no es seguro, y es el turno propio, ¿cómo determinar la posición segura a la que se debe mover? Es necesario distinguir tres casos. En todos ellos, el par inseguro se llamará x/y, siendo x el menor de ambos números, y ambos números se supondrán expresados en notación de Fibonacci.

...	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
...	55	34	21	13	8	5	3	2	1	1	
				1	0	0	1	0	1	0	= 17

17 en notación de Fibonacci

En el primer caso, x es un número *B*. La jugada consiste en reducir y hasta el número obtenido suprimiendo en x la última cifra. Por ejemplo, $x/y = 10/15 =$ 100100/1000100. Como el último 1 de 100100 ocupa lugar impar, es un número *B*. Suprimiendo el último digito queda $10010 = 6$. Los números del par seguro son 10 y 6; la jugada consistirá en disminuir adecuadamente el montón más grande, y, en el tablero de ajedrez, en bajar perpendicularmente la dama.

En el segundo caso, x es un número *A*, pero y supera al número obtenido añadiéndole un 0 a x. La jugada consiste en reducir el valor de y hasta este número. Así, $x/y = 9/20 = 100010/1010100$, según puede comprobarse.

Como el último 1 de x está en lugar par, x es un número *A*. Añadiéndole un 0 resulta $1000100 = 15$, que es menor que 20. Por lo tanto, se debe jugar al par seguro 9/15; en el tablero sería un desplazamiento horizontal de la dama.

Si los números no se ajustan a los casos 1 y 2, se procede como sigue:

1. Se halla la diferencia positiva entre x e y.

2. Se resta 1, se expresa el resultado en notación de Fibonacci y se cambia a 1 el último dígito.

3. Se añade 0 y se obtiene un número. Añadiendo dos ceros se obtiene un segundo número. Estos dos números constituyen el par seguro buscado, aunque los números de Fibonacci resultantes pueden no estar en forma "canónica", porque pueden tener unos consecutivos.

Como ejemplo de este tercer caso tenemos $x/y = 24/32 = 10001000/10101000$. Los dos primeros casos no resuelven el problema. La diferencia entre 24 y 32 es 8. Restando 1 quedan 7. En notación de Fibonacci, 7 es 10100. Cambiando a 1 el último dígito se obtiene 10101. Añadiendo 0 y 00 se obtiene el par seguro $101010/1010100 = 12/20$. A este resultado se llega retirando 12 piezas de cada montón; en el tablero representa un movimiento diagonal de dama.

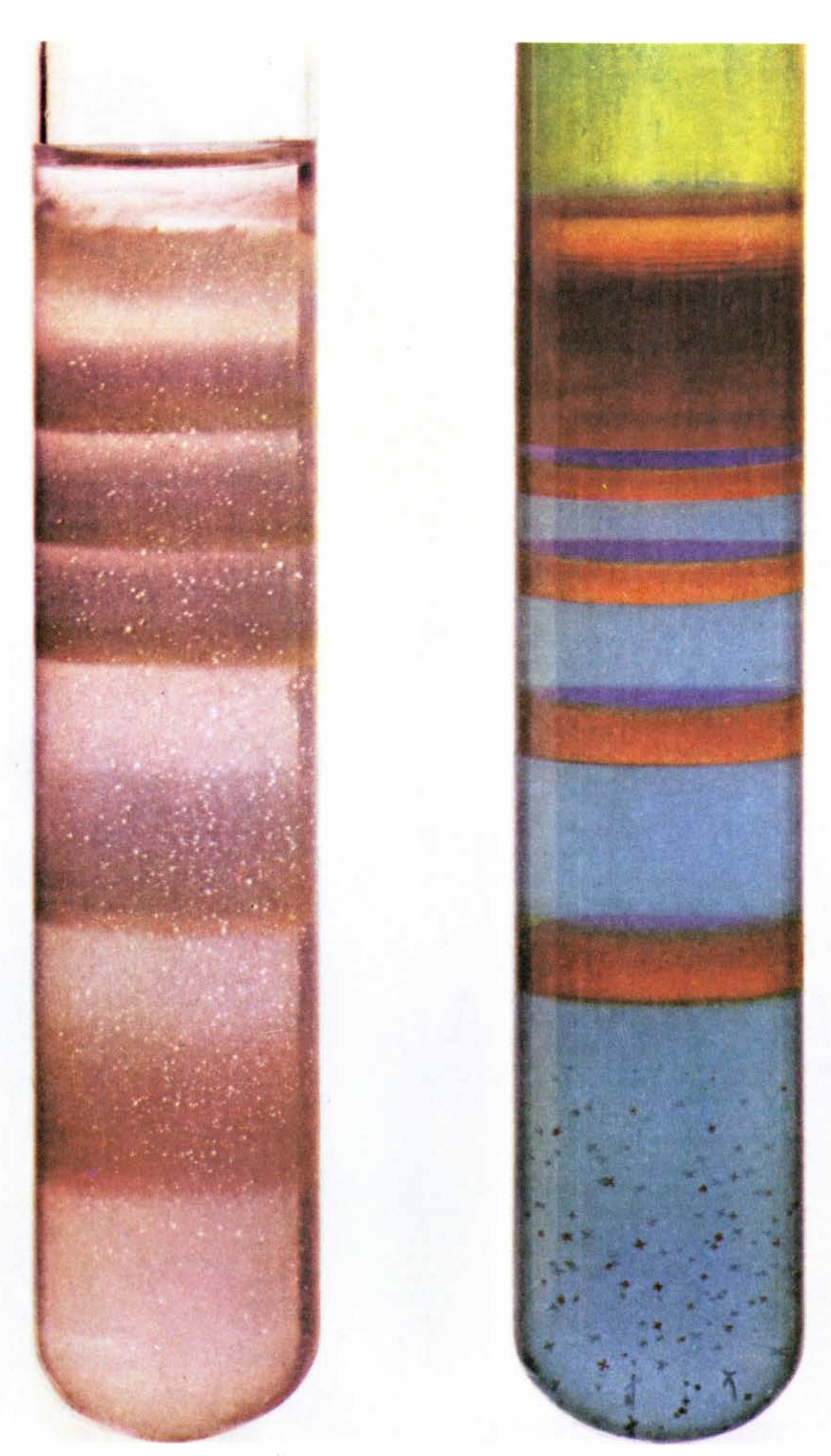
Es imposible entrar en las causas de la peculiar estrategia de Silber. Los lectores curiosos o interesados pueden consultar las demostraciones del artículo de Silber, "Wythoff's Nim and Fibonacci Representation", en el número de febrero de *The Fibonacci Quarterly*. (Esta revista puede solicitarse de la Fibonacci Association; la suscripción anual cuesta 15 dólares. Dirigirse a la Fibonacci Association. Leonard Klosinski, University of Santa Clara, Santa Clara, California, 95053.)

Tampoco puedo entrar en los distintos modos en que el juego de Wythoff ha sido generalizado, pero quizá convengan una o dos palabras sobre la versión negativa del juego. En ella, el último en jugar pierde. Como bien expone T. H. O'Beirne, en *Puzzles and Paradoxes* (Oxford, 1965), la estrategia ganadora para el nim de Wythoff negativo, lo mismo que el nim negativo ordinario, sólo exige una modificación trivial de la tabla de pares seguros. Se retira el primer par, 1/2, y se introducen los nuevos pares 0/1 y 2/2. La estrategia negativa es idéntica a la ordinaria, excepto en que al final puede ser necesario jugar 2/2 o 0/1, en lugar de 1/2.

Modificaremos el nim de Wythoff como sigue: ambos jugadores pueden retirar un número positivo cualquiera de piezas de uno de los montones, o bien tomar una pieza de un montón y dos del otro. ¿Podrá el lector determinar el juego equivalente sobre tablero de ajedrez, así como la estrategia ganadora, antes de que sean publicadas en el próximo número?

El problema de diciembre, aún no completamente resuelto, consistía en demostrar o infirmar que en un tablero de ajedrez de n casillas de lado pueden situarse $2n$ fichas de modo que nunca haya "tres en raya". Las rectas pueden tener cualquier orientación. Yo presenté soluciones para tableros de orden 12 o menor. Los lectores han extendido estas soluciones hasta el orden 16.

Richard Byfield, Richard Jacobson, Anne de Lamper y Robert Van Clampitt hallaron a mano, individualmente, una solución de orden 13. Michael Meierruth escribió un programa no exhaustivo para computador que produjo 29 soluciones de orden 13 y una de orden 15. Posteriormente, encontró una solución de orden 14 y cuatro soluciones de orden 16. Eric Jamin encontró, a mano, cuatro soluciones de orden 14 y una de orden 16. La ilustración de la página 103 muestra algunas configuraciones de los órdenes 13, 14 y 16, así como la única conocida hasta ahora de orden 15, que yo sepa.



Bandas de Liesegang: oro coloidal (izquierda) *y cromato de cobre* (derecha), *con cristales de oro y cromato de cobre visibles*

Taller y laboratorio

Las sales reaccionan en un gel para producir bandas de Liesegang en color

C. L. Stong

En 1896, el químico alemán R. E. Liesegang, mientras experimentaba con materiales fotográficos, descubrió un fenómeno raro. Había derramado en un recipiente de vidrio una capa fina de gel de gelatina que contenía cromato de potasio. Había introducido luego un cristal de nitrato de plata en medio del gel. A los pocos días, creció expandiéndose un conjunto de anillos concéntricos, a partir del nitrato de plata, de modo que los espacios interanulares aumentaban logarítmicamente según su distancia al centro. Liesegang observó que los anillos coloreados eran cristales de cromato de plata incrustados periódicamente en el gel. No resultaba sorprendente que se formaran cristales por la reacción del nitrato de plata con el cromato de potasio, pero, ¿por qué reaccionaban las sales para formar anillos periódicos?

Otros investigadores han venido repitiendo el experimento desde entonces usando numerosas sales y geles que producen bandas rítmicas. Algunas reacciones originan bandas logarítmicas secundarias; otras forman bandas periódicas, pero no logarítmicas. En su conjunto, los modelos muestran todos los colores del arco iris.

En la naturaleza se encuentran modelos similares, unos en minerales, como en la limonita y en la calcedonia, y otros en animales, como en las alas de ciertas mariposas polícromas. Nadie cree que estos modelos naturales sean consecuencia de la reacción de Liesegang; es más, ni siquiera la reacción ha sido explicada a satisfacción de todos. El enigma continúa intrigando a los aficionados y a los científicos.

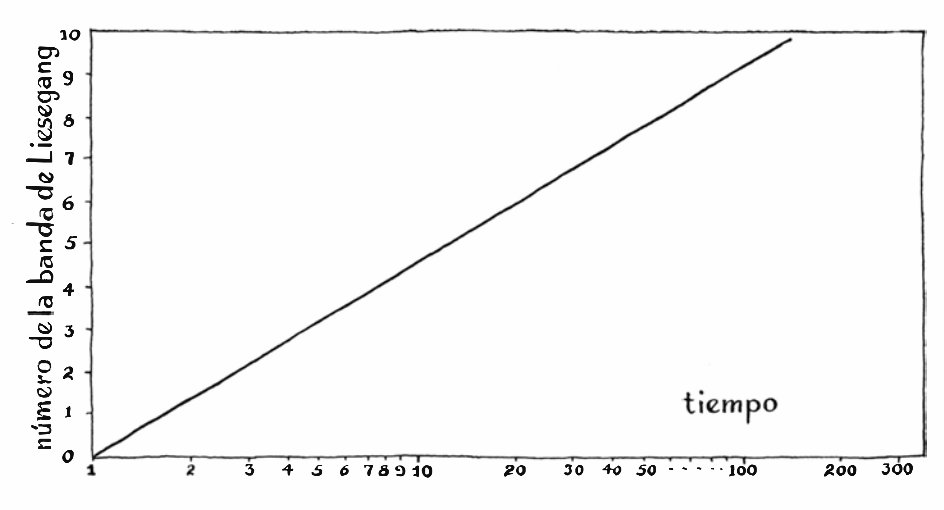
Así nos escribía un joven estudiante: El experimento de Liesegang requiere sólò unos pocos aparatos, no muy costosos: una balanza capaz de pesar productos químicos de hasta 0,1 gramos, una probeta graduada de 10 mililitros de capacidad, otra de 50 mililitros y una pipeta graduada de un mililitro con divisiones de 0,1 mililitros o, preferiblemente de 0,01 mililitros. Hay que disponer, además, de unos cuantos recipientes planos y de una docena de tubos de ensayo con una capacidad de 30 a 50 mililitros para utilizarlos en la reacción.

El éxito de los experimentos depende, en parte, de la preparación de disoluciones de concentración conveniente. Especificaré las concentraciones según su molaridad. Por convención, una solución uno molar (1M) de cualquier compuesto químico contiene $6,023 \times 10^{23}$ moléculas de este compuesto por litro de solución. Este número de moléculas, conocido como número de Avogadro, es exactamente igual al peso molecular del compuesto expresado en gramos. Por ejemplo, una molécula de ácido acético (CH_3COOH) contiene dos átomos de carbono (cuyo peso atómico de cada uno es 12), dos átomos de oxígeno (cada uno de peso atómico 16) y cuatro átomos de hidrógeno (cada uno de peso atómico 1). Sumando los pesos atómicos $(24+32+4)$ el peso molecular del ácido acético resulta ser 60. Sesenta gramos de ácido acético contienen, pues, $6,023 \times 10^{23}$ moléculas que, diluidas en agua hasta formar un volumen de 1000 mililitros, forman una solución de concentración 1 molar. Para preparar una solución 0,1 molar debe diluirse en agua seis gramos de ácido hasta formar un volumen de 1000 mililitros, y así sucesivamente. Los pesos atómicos de todos los elementos químicos y los pesos moleculares de muchos compuestos se encuentran publicados en todos los manuales.

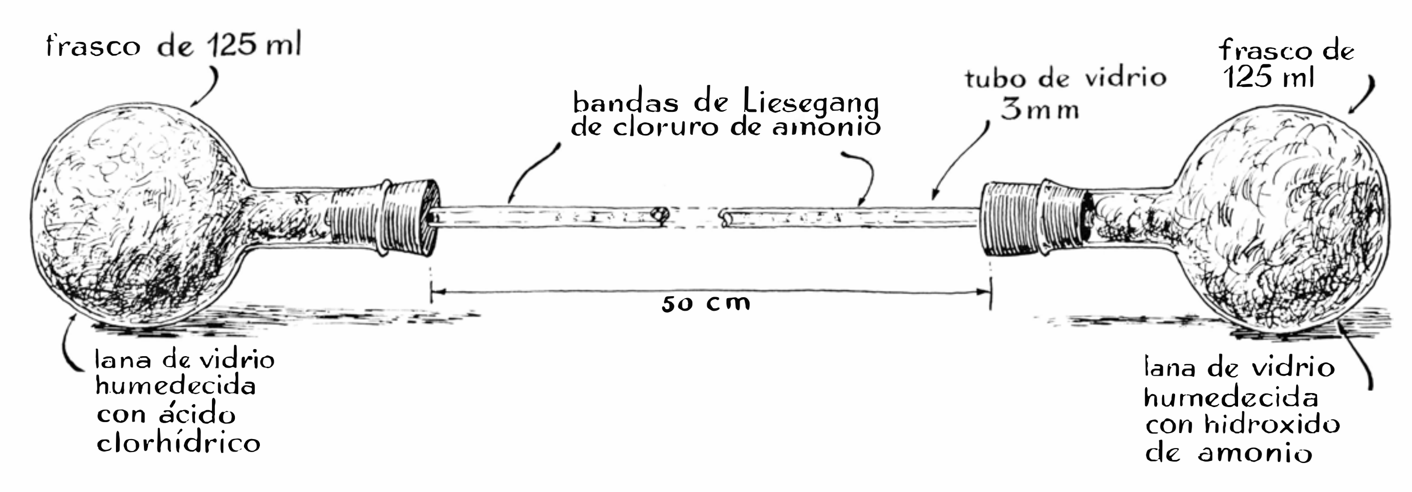
Liesegang hizo su experimento con gel de gelatina, pero pueden utilizarse otros geles: por ejemplo: agar, gel de plasma sanguíneo, coagulados derivados de la celulosa y el gel de sílice. Realicé la mayoría de mis experimentos con gel de sílice, preparado al añadir ácido acético a una solución de silicato de sodio, denominada comúnmente vidrio soluble.

En las droguerías puede adquirirse solución de silicato de sodio. Hay que diluirlo hasta que alcanze una densidad de 1,06 gramos por mililitro. La densidad del material comercial suele ser desconocida, pero puede determinarse pesando una muestra de la solución. Pese un recipiente seco y limpio. Traspase a este recipiente 100 mililitros exactos de solución y pese de nuevo. Reste el peso del recipiente lleno para determinar el peso neto de la solución. Habitualmente, el peso neto de 100 mililitros de una solución comercial de silicato de sodio es de unos 130 gramos.

Supongamos que, en este ejemplo, el peso es de 130 gramos. El peso indica



Crecimiento logarítmico de las bandas de Liesegang con relación al tiempo



Aparato de Roger Sassen para desarrollar las bandas en un gas

que la solución contiene 30 gramos de silicato de sodio, ya que 100 mililitros de agua pesan, aproximadamente, 100 gramos. La solución que ha de usarse para decantarse en un estado de gel debe contener solamente seis gramos de silicatc de sodio por 100 mililitros de solución. La solución necesaria se halla dividiendc treinta por seis, obteniéndose así un cociente de cinco. El silicato de sodio, cor una densidad de 1,06, puede obtenerse en este caso agregando una parte de solución comercial en cuatro partes de agua.

Por conveniencia, preparo varios litros de solución diluida al mismo tiempo. Siempre empleo agua destilada en todas las soluciones. La solución de silicato de sodio diluida se convierte en gel inmediatamente antes de usarse en cada experimento. El gel se prepara añadiendo a la solución diluida un volumen igual de solución de ácido acético cuya concentración esté comprendida en el intervalo de 0,5M a 1 M, en función de las exigencias del experimento. El gel se formará en menos de una hora.

Cuando se examina el gel en un microscopio, parece una esponja empapada en agua. La velocidad de las reacciones químicas en gel de sílice está regida por la lentitud con que los fluidos se difunden a través de la masa porosa. Por esta razón, los cristales crecen despacio en el gel, si bien muestran una notable perfección de forma.

Como introducción a la técnica del gel puede crearse cristales de acetato de plata, que son largos, coloreados y en forma de agujas. Se mezclan 10 mililitros de silicato de sodio diluido, de densidad 1,06, con 10 mililitros de ácido acético 1M y se traspasan a un tubo de ensayo de 30 mililitros. Después de formado el gel, se llena el espacio restante por encima de él con una solución 0,5M de nitrato de plata. Los cristales van apareciendo a los pocos días, a medida que el nitrato de plata se va difundiendo en el gel.

Para reproducir una versión del experimento de Liesegang, se disuelve tres gramos de gelatina ordinaria, sin endulzar ni aromatizar, en 96,6 gramos de agua calentada a 60 °C. Se agita 0,4 gramos de cromato de potasio dentro de la mezcla. Se vierte la mezcla dentro de un recipiente poco profundo y se deja enfriar. Mientras se va enfriando, se disuelve un cuarto de gramo de nitrato de plata en un mililitro de agua. Cuando se haya formado el gel, se introduce con suavidad una gota de solución de nitrato de plata en el gel, hacia el centro. A los pocos minutos comenzarán a formarse anillos de cromato de plata.

Prefiero dejar que las reacciones se desarrollen en tubos de ensayo, de tal suerte que aparezcan bandas en vez de anillos. Los tubos pueden cerrarse con tapones para evitar la evaporación, de forma que las reacciones puedan continuar sin estar uno pendiente en todo momento de ellas. La técnica del tubo de ensayo resulta particularmente conveniente en reacciones que se prolonguen a lo largo de varias semanas; así, el acetato de cobre y del cromato potásico que se combinan para formar interesantes bandas especiales de cromato de cobre.



Anillos de limonita en el basalto

Prepare el gel para esta reacción mezclando 20 mililitros de silicato de sodio con 20 mililitros de una solución formada por dos mililitros de cromato de potasio 1M y 0,6 mililitros de ácido acético concentrado. Traspase la mezcla a un tubo de ensayo de 50 mililitros. Después de que el gel se haya formado, llene el resto del tubo con disolución de acetato de cobre 0,25M; sustitúyala luego con solución fresca de acetato de cobre cada semana. Cuando aparezcan algunas bandas será posible verificar la ecuación que relaciona las distancias de las precipitaciones sucesivas de Liesegang con una constante $Y_n/Y_{n-1}=K$, en la que Y es la distancia desde la interfase entre el líquido y el gel al centro de la banda elegida, n es el número de orden de la banda, a partir de la interfase, y K es la constante.

Las bandas de Liesegang pueden formarse en una semana si se usan tubos capilares en vez de tubos de ensayo. Los capilares deberán tener un diámetro uniforme, como los que se emplean para determinar el punto de fusión de productos químicos. Los extremos sellados de los tubos empleados para determinar el punto de fusión deben estar rotos. Para formar bandas de cromato de cobre con esta técnica, sostengo el capilar en posición casi horizontal y sumerjo un extremo en una solución recientemente preparada de silicato de sodio y un volumen igual de ácido acético 0,5M que es, a la vez, 0,25M respecto del cromato de potasio. El tubo se llena por capilaridad. Cuando se ha formado el gel, el tubo se coloca para que la reacción se desarrolle en un tubo de ensayo tapado que contenga solución de acetato de cobre, 0,25M.

Una vez desarrollada la reacción, se saca el capilar del tubo de ensayo para estudiarlo. Las distancias entre las bandas pueden registrarse con un lápiz sujetando el capilar a un trozo de papel y midiendo con una regla y un pie de rey. Las bandas se forman tan rápidamente en los capilares que, en algunos casos, se puede verificar la ecuación que establece que la distancia a una banda desde la interfase, dividida por la raíz cuadrada del tiempo requerido para su formación, es igual a una constante, $Y_n/t_n{}^{1}/_{2}=K$ en donde Y es la banda que nos interesa y t es el tiempo.

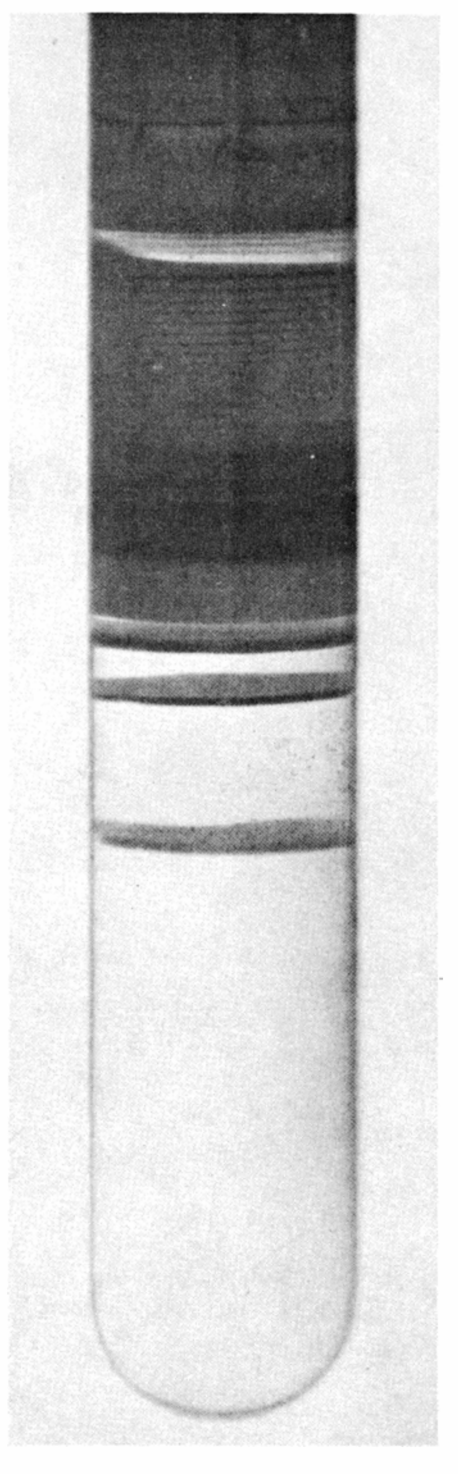
Un experimento particularmente atractivo consiste en la precipitación de oro metálico y en el desarrollo de una serie en bandas al exponer el gel a la luz del sol. Para hacer este experimento hay que preparar una solución de silicato de sodio que incluya un mililitro de solución al 1 por ciento (en peso) de cloruro de oro amarillo. Se traspasa la mezcla a un tubo de ensayo y se convierte en gel añadiendo un volumen igual de ácido sulfúrico 1,5M. La conversión en gel tarda aproximadamente una semana. Se llena el espacio remanente sobre el gel con una solución hecha disolviendo en agua tanto ácido oxálico cuanto sea posible, creando una solución saturada. Al cabo de algunos días se formarán en el gel miles de cristales de oro, diminutos y brillantes. Si todo ha ido bien, las bandas de Liesegang aparecerán una vez que el gel se haya expuesto a la luz solar.

La naturaleza del gel influye en la forma de los productos cristalizados, como puede demostrarse por el crecimiento de los cristales de yoduro de plomo. En un tubo de ensayo, se prepara un gel de sílice con solución de ácido acético 1M que sea 0,05M con relación al acetato de plomo. Sobre el gel se vierte una solución saturada de yoduro de potasio. Aparecerán cristales translúcidos de yoduro de plomo amarillo, formando dendritas empenachadas y placas hexagonales de crecimiento independiente. Cuando se sustituye el gel de gelatina por gel de sílice, la misma reacción produce las bandas de Liesegang.

Pueden obtenerse también modelos en espiral. Un ejemplo puede ser el precipitado verde del hidróxido de cobalto. Mezcle cinco mililitros de solución de nitrato de cobalto 0,1M con treinta mililitros de solución de gelatina al 10 por ciento, caliente, en un tubo de ensayo de 50 mililitros. Después de que el gel se enfríe y sedimente, llene el espacio vacío con una solución de hidróxido de amonio 0,2M. Puede formarse una espiral o algún modelo en espiral, pero no siempre ocurre así. Si no sucede, ensaye de nuevo.

Liesegang sugirió que los anillos y bandas de las ágatas surgían cuando el fenómeno que lleva su nombre se producía en geles de sílice sencillos que se convertían más tarde en cuarzo microcristalino, pero actualmente los geólogos coinciden en que los modelos de ágata pueden atribuirse a depósitos sucesivos de capas de gel de sílice y de impurezas. También aparecen modelos de bandas en algunas estalactitas, en oolitos, en algunos sedimentos y, desde luego, en los anillos de los árboles. Cuando en el patrón de estos materiales se representa el número de orden de cada banda en función del logaritmo de la distancia de la banda desde su origen, el gráfico resultante suele ser una curva. En cambio, los gráficos comparables de casi todos los modelos conocidos de Liesegang son líneas rectas *(véase la ilustración de la página 109)*. Las estructuras de la limonita, que crecen en forma de anillos concéntricos durante el envejecimiento de las rocas sedimentarias, dan lugar a gráficos que se aproximan a una línea recta. En muchas muestras, los anillos aparecen distorsionados e incompletos.

Durante la década de los veinte se prepararon ágatas sintéticas en el laboratorio con el fin de descubrir las condiciones que pudieran causar la formación de anillos de Liesegang en un medio ambiente natural. Se introdujo gel de sílice que contenía ferrocianuro de potasio en



Bandas de vanadato de mercurio



Cristales de plata en gel de sílice

bolsas de colodión, y se las sumergió en solución de sulfato de cobre. Después de algunas semanas, los iones de cobre se difundieron en las partículas del gel y reaccionaron para formar precipitados tridimensionales en forma de banda. Las ágatas sintéticas se secaban después lentamente bajo presión hasta que adquirían una dureza de alrededor de cinco de la escala de Mohs, lo que significa que eran tan duras que apenas si se podían rayar con un cuchillo. Aunque el experimento era sugerente, no bastó para probar que las ágatas se forman de esta manera.

Es fácil realizar una versión bidimensional de este experimento. Haga crecer anillos concéntricos de cromato de cobre en una capa fina de gel de sílice situada entre dos portaobjetos de microscopía. Vierta una mezcla de gel de sílice hecha con ácido acético 0,5M, que es 0,25M con relación al cromato de potasio, sobre un portaobjetos, y ponga el otro sobre él, teniendo cuidado de no atrapar burbujas de aire en el gel. Se puede crear una capa más gruesa, en la que los anillos sean más fáciles de ver, aumentando la distancia entre los portaobjetos, mediante la introducción de unas cuantas partículas de vidrio aplastado.

Sumerja el emparedado en una solución de acetato de cobre 0,25M. En una semana, conforme los iones de cobre se vayan difundiendo hacia el interior, precipitarán en anillos concéntricos. Estos se parecen a los anillos de la limonita que se encuentra a veces en las grietas de las rocas, lo que sugiere que tales formaciones pueden ser ocasionadas por la penetración de soluciones de agua subterránea dentro de la roca agrietada *(véase la ilustración inferior de la página 110)*.

Se puede demostrar que la presencia de gel en rocas agrietadas no es indispensable para la creación de tales conformaciones. Coloque entre dos portaobjetos de vidrio una solución de yoduro de potasio 0,1M y deje difundir dentro de la fina película una solución 0,5M de nitrato de plata. Normalmente aparecerán anillos delicados e irregulares. El experimento no siempre tiene éxito, por lo que puede recurrirse al método de ensayo y error.

Puede observarse otros ejemplos de estructuras periódicas que se forman sin gel, dejando evaporar desde la superficie de un vidrio una gota de solución saturada de dicromato de potasio. Se desarrollarán anillos concéntricos de cristales color naranja. El fenómeno se denomina cristalización periódica. Se formarán tenues espirales de cristales de dicromato de potasio, si se deja que una película delgada de solución se evapore sobre un portaobjeto de vidrio ligeramente calentado. La cristalización suele comenzar cerca de los bordes y avanza hacia dentro en espiral, pero si se aloja una partícula de polvo en las proximidades del centro de la película, la cristalización puede comenzar junto a esta partícula y avanzar en espiral hacia el exterior.

Las estructuras periódicas cristalinas se preparan también enfriando películas finas de sustancias fundidas. Un ejemplo de ello es una película fina de azufre fundido que se enfríe lentamente sobre las paredes de un tubo de ensayo Pyrex. Hay sustancias orgánicas fundidas, tales como el bencilo y la acetanilida, que cristalizan en anillos concéntricos.

Otro ejemplo interesante del fenómeno de Liesegang, empleando aire como medio en vez de gel, se produce cuando los vapores de ácido clorhídrico y de hidróxido amónico se difunden en el interior de un tubo largo de cristal partiendo desde extremos opuestos. Al cabo de una hora, se formará un precipitado de bandas finas de cloruro amónico fumante aproximadamente en la mitad del tubo. Construya el aparato cortando un trozo de 50 a 75 centímetros de tubo de vidrio de tres milímetros de diámetro; limpie en la llama los extremos, lave el tubo con solución de detergente, enjuáguelo con agua destilada y déjelo secar. (No use tubo de más de tres milímetros de diámetro.)

Acople a los extremos del tubo matraces que tengan una capacidad de unos 100 mililitros y que estén llenos con lana de vidrio poco prensada. Los matraces pueden improvisarse usando tubos rectos secos o con cualquiera de los aparatos equivalentes, tales como un par de frascos de 125 mililitros cerrados con tapones perforados *(véase la ilustración superior de la página 110)*. El aparato debe sellarse al aire; una pequeña fuga puede estropear la reacción. El tubo de difusión debe estar nivelado y protegido contra cambios bruscos de temperatura. Humedezca la lana de vidrio de un matraz con dos mililitros de ácido clorhídrico 10M y la lana del otro matraz con el mismo volumen de hidróxido amónico 1,5M. Estas soluciones pueden hacerse partiendo de las existencias de reactivos. El ácido clorhídrico concentrado suele ser 12M y, 15M el hidróxido amónico concentrado que suele emplearse.

Las configuraciones de Liesegang aparecen como anillos o bandas, pero algunas son figuras simétricas. Una línea recta trazada sobre el eje de simetría divide estas formas en dos imágenes especulares que semejan las huellas de algunos organismos. Esta semejanza, unida al hecho de que el cuerpo de las células vivientes contiene gel, ha sugerido a algunos biólogos la posibilidad de que el fenómeno de Liesegang pudiera tener significación biológica.

Darwin describió configuraciones de color en muchos organismos. Liesegang estuvo tentado de explicar dichas configuraciones como ejemplos de precipitación periódica. «Ya que ningún adorno es más hermoso» dijo, «que los ocelos de las plumas de varios pájaros, que los abrigos vellosos de ciertos mamíferos, que las escamas de los reptiles y los peces, que la piel de los anfibios, que las alas de muchos lepidópteros y de otros insectos, merecen ser destacados de modo especial. Un ocelo consiste en una mancha dentro de un anillo de otro color, como la pupila dentro del iris, pero la mancha central está frecuentemente rodeada de zonas concéntricas adicionales». Darwin describió una mariposa nocturna de Africa del Sur en la cual un magnífico

ocelo ocupaba casi la totalidad de la superficie de las alas posteriores; consiste en un centro negro... rodeado por zonas sucesivas de colores ocre-amarillo, negro, ocre-amarillo, rosa, blanco, rosa, marrón y blanco pálido. Aunque desconocemos las etapas por las que se forman estos adornos maravillosamente bellos y complejos, el proceso ha sido probablemente sencillo.

Usando como medio un gel, se puede formar configuraciones fascinantes de diseño y color similar. Por ejemplo, en uno de mis experimentos, el efecto se demostró dejando difundirse una solución que contenía nitrato de plata y nitrato de mercurio en una capa de gel que ocupaba el espacio remanente entre dos portaobjetos de vidrio. El gel, hecho con solución de ácido acético 0,5M, era 0,25M con relación al cromato de potasio. Dicho sea de paso, hay colonias de ciertos microorganismos que crecen en estructuras consistentes en espirales o bandas concéntricas; y se han usado, asimismo, bandas de Liesegang de sustancias inhibidoras del crecimiento para favorecer el crecimiento de cultivos de bacterias en forma de anillos concéntricos.

No se han producido muchos modelos de Liesegang con reactivos orgánicos, aunque algunos experimentadores han inducido la precipitación periódica de compuestos haciendo reaccionar sustancias inorgánicas con compuestos orgánicos. Estas reacciones son más rápidas si el compuesto orgánico que se difunde lentamente se coloca en un gel. Puede desarrollar bandas colocando una solución de nitrato de níquel sobre el gel de sílice preparada con solución de ácido acético 0,5M que contenga vestigios de dimetilglioxima. El que un amplio número de reacciones orgánicas pudieran producirse en un gel como medio y pudiesen tener significación bioquímica permite abrigar la esperanza de que la búsqueda de nuevos ejemplos orgánicos del fenómeno de Liesegang acabe por convertirse en un entretenimiento retador emocionante.

La mayoría de los compuestos químicos usados en estos experimentos son tóxicos. Algunos pueden causar graves quemaduras. Manéjelos apropiadamente. Use un balón de goma elástico, y no la boca, para aspirar las soluciones de una pipeta. Trabaje en una estancia ventilada y próxima a una fuente de agua corriente, de manera que, en caso de accidente, pueda lavarse rápidamente la piel para eliminar los productos químicos. Guarde los productos químicos fuera del alcance de los niños y de los animales domésticos.

Libros

El mundo de los microprocesadores y la maravillosa historia de los puentes

Juan R. Ribera y Emilio López-Oliva

DEL MICROPROCESADOR AL MICROORDENADOR. H. Lilen; trad. Manuel Puigbó Rocafort. Editorial Marcombo, S. A., Barcelona, 1976. El libro, básicamente descriptivo, nos introduce en el mundo del microprocesador. Es éste un ente nuevo que empieza a aplicarse en telecomunicaciones, control de luces de tráfico, economización de combustible en el automóvil, control de plantas industriales, mando de terminales de datos, instrumentación, recogida de datos, secuenciadores para electrodomésticos, periféricos de ordenadores e interfases de equipos.

El microprocesador aún no ha llegado al gran público. Quizá no llegue nunca, pues este componente puede confundirse fácilmente con un circuito de alta integración hecho por encargo, pudiendo figurar como una pieza más de un equipo electrónico. O quizá sí llegue al público en forma de microordenador. De hecho, algunas compañías tratan de introducirlo como tal (Micral R-2-E, IMSAI 8080).

Después del ordenador de gran potencia y del advenimiento del miniordenador, parece que no cabe otra diferenciación en el campo de las máquinas informáticas. Pero el microprocesador no es una máquina informática, sino una o varias pastillas de silicio de unos 4 milímetros cuadrados de superficie cada una, encerradas dentro de una galleta cerámica o plástica de pocos centímetros de longitud (chip), de la cual salen unas patas para conexionar la pastilla de silicio a los demás circuitos de su entorno. Esta pastilla tiene grabados en su superficie, por métodos de difusión química, de 5000 a 20.000 transistores, que se estructuran en forma de Unidad Central de Proceso de un ordenador (unidad de decodificación de órdenes, mando y unidad aritmética y lógica).

El microprocesador tiene una razón de existencia: su precio. La unidad central de un miniordenador tipo cuesta unos 10.000 dólares. El microprocesador con memoria, entradas y salidas y su reloj puede llegar a 3 dólares, si bien ello comporta que el microprocesador sea unas 20 veces más lento que un miniordenador que cuesta 3000 veces más, y, por tanto, hay que comprarlo en grandes cantidades. Su bajo coste abre al microprocesador un amplio abanico de posibilidades.

El microprocesador puede sustituir con ventaja a la lógica cableada, si ésta no es muy rápida (el autor estima que el porcentaje de sustitución por parte de los microprocesadores será de un 62 por ciento), puede sustituir a muchos controladores electromecánicos (sustitución 11 por ciento) y a los miniordenadores (18 por ciento). Pero un 40 por ciento de los microprocesadores se utilizan en nuevas aplicaciones, porcentaje que crecerá con los años, convirtiéndolos en aparatos insustituibles. Hoy se le abren los campos de la instrumentación (16 por ciento de las aplicaciones utilizan micros), comunicaciones (16 por ciento), informática (14 por ciento), aerospacial (13 por ciento), industria (13 por ciento), ejército (10 por ciento), medicina (3 por ciento), gran público (3 por ciento), despachos (2 por ciento), enseñanza (2 por ciento), transportes (1 por ciento) y varios (6 por ciento).

El concepto de microordenador queda claro. El microprocesador necesita para su funcionamiento una memoria de programa, una memoria de datos, un oscilador o reloj y un conjunto de líneas de entrada y salida. Se llama microordenador al conjunto de todos estos elementos interconexionados, listos para funcionar. Un microordenador puede estar constituido por una sola galleta (TMS 1000 de Texas Instruments), o, en los sistemas más complejos, puede estar constituido por doscientas galletas en sus circuitos impresos (64K octetos de memoria, 64 líneas de entrada y salida, lógica de interrupción y acceso directo a memoria).

Para cada aplicación, el proyectista deberá escoger, dentro de lo ofrecido en el mercado, un microprocesador y los componentes de su interés, o un microordenador ya montado, que, en cualquier caso, adaptará a su uso. Así, un solo modelo de microprocesador puede adaptarse a un amplio espectro de aplicaciones muy distintas. Esta adaptación presupone, como mínimo, la programación del microprocesador, adaptación que a veces hará necesario añadir circuitos electrónicos (contadores, temporizadores, puertas lógicas), e inclusive construir un microordenador específico a partir del microprocesador y de los componentes escogidos. De modo que el proyecto de un equipo controlado por un microprocesador presupone para el técnico una serie de conocimientos que el libro introduce. La obra no ofrece nunca herramientas de diseño, aunque presupone bastantes conocimientos en informática y electrónica.

No todos los circuitos integrados utilizan los mismos procesos de fabricación. Ello es importante porque, a distinto proceso, diferente logro. Así, el ECL (Emitter Coupled Logic=lógica acoplada al emisor) es extremadamente rápido, pero consume mucha energía eléctrica; el TTL Shottky (Transistor Transistor Logic=lógica transistor transistor) es rápido y consume menos; el PMOS (P channel Metal Oxide Semiconductor=semiconductor de óxido metálico, canal P) y el NMOS (N channel Metal Oxide Semiconductor=semiconductor de óxido metálico, canal N) son más lentos, pero son de bajo consumo y mucho más económicos: para muy bajo consumo, se dispone del CMOS (Complementary MOS=MOS complementario). Se están comercializando procesos que intentan reunir las ventajas de los anteriores: el SOS (Silicon On Saphire= silicio sobre zafiro) y el I2L (Injection Logic=lógica de inyección).

El microprocesador realiza el proceso de la información gracias a las operaciones aritméticas y lógicas que es capaz de llevar a cabo. De esta forma, se trabaja en aritmética de complemento a dos, mencionándose algunos algoritmos de las cuatro operaciones básicas en coma fija, y se menciona la codificación en coma flotante y en BCD (Binary Codified Decimal=decimal codificado a bi-

nario). En las operaciones lógicas se incluyen, además de las funciones booleanas (O, Y, NO), las básculas necesarias para constituir los distintos registros del microprocesador. Ello permite mencionar el enmascaramiento de bits (binary digit), la selección lógica, la detección de un cambio de estado mediante la función O– exclusivo, el semisumador, y el sumador completo además de los distintos desplazamientos de los registros.

Un componente importante del microprocesador es la memoria. Sus características se resumen en el tipo de acceso a su información y su volatilidad o destructibilidad. Así quedan explicadas las distintas RAM (Random Access Memory=memoria de acceso aleatorio), las ROM (Read Only Memory=memoria sólo para leer), las PROM (Programable ROM="ROM" programable), las EPROM (Erasable PROM="PROM" borrable), los MNOS (Metal, Oxido, Nitruro, Silicio), las CAM (Context Addressable Memory=memoria de contexto), los distintos tipos de registros (a desplazamiento, FIFO y LIFO [es decir, "First in, First Out": "Last in, First Out" = primero que entra, primero que sale; último que entra, primero que sale]), las CCD (Charge Coupled Devices= dispositivos acoplados a carga) y las memorias de burbuja magnética.

El microprocesador también necesita para su funcionamiento, unos programas y unos datos (información a tratar), que, junto con sus técnicas asociadas, constituyen el soporte lógico. El programa y sus datos son almacenados en la memoria, en un conjunto de casillas numeradas correlativamente. Cada casilla contiene de 4 a 16 bits en el caso de los microprocesadores usuales. Este conjunto de bits se llama palabra. Los datos se adquieren a través de los circuitos de entrada y, una vez procesados, son enviados a los circuitos de salida. Para el control del programa y el manejo de los datos, el microprocesador dispone del propio programa y de la unidad central del proceso (UCP), con un contador ordinal de instrucciones, su registro de instrucciones, el acumulador, su unidad aritmética y lógica (ALU), sus indicadores (bit de arrastre, bit de cero), su cadencia (suministrada por el oscilador) y sus múltiples tipos de direccionamiento (directo, inmediato, indexado, relativo, indirecto). Ello permite escribir programas absolutos, trasladables y/o reentrantes.

Los elementos del programa son las instrucciones. Estas pueden entrar microprogramadas en el firmware (conjunto de operadores lógicos que decodifica las instrucciones y que está localizado físicamente en una zona de la galleta del microprocesador). Las instrucciones se cuidan de hacer circular los datos de los circuitos de entrada y salida a la UCP o a la memoria directamente (DMA Direct Memory Access, acceso directo a memoria), a través de la vía de datos (o bus), constituida físicamente por unos conductores asignados cada uno a un bit de la palabra, por los cuales, en el momento de la transferencia de un dato, circula o no circula corriente, en función de que el bit que tienen asignado del dato transmitido sea verdadero o falso. Las instrucciones pueden realizar distintas operaciones aritméticas y lógicas con los datos y romper la secuencia de ejecución en función de ellos. Así, los programas se estructuran en bucles y subprogramas, a los que se accede y de los que se sale gracias a las instrucciones de ruptura de secuencia, que pueden hacerlo en función del dato al que se accede o del resultado de una operación (bifurcaciones y llamadas a subprogramas, condicionales). Las interrupciones, con sus niveles y prioridades, la detección de los fallos de la alimentación y el reloj en tiempo real son los últimos elementos de la arquitectura que se examinan.

El autor hace a continuación una descripción sumaria de algunos periféricos (teleimpresor, lector-perforador de cinta, casettes, terminales con pantalla catódica, impresoras, disco flexible, disco rígido, modems), que si bien son usados a veces por los microordenadores, presuponen una visión informática del ordenador. Es decir, no están todos los que son (discos codificadores, visualizadores numéricos, conversores analógico-digitales y digital-analógicos, etc.).

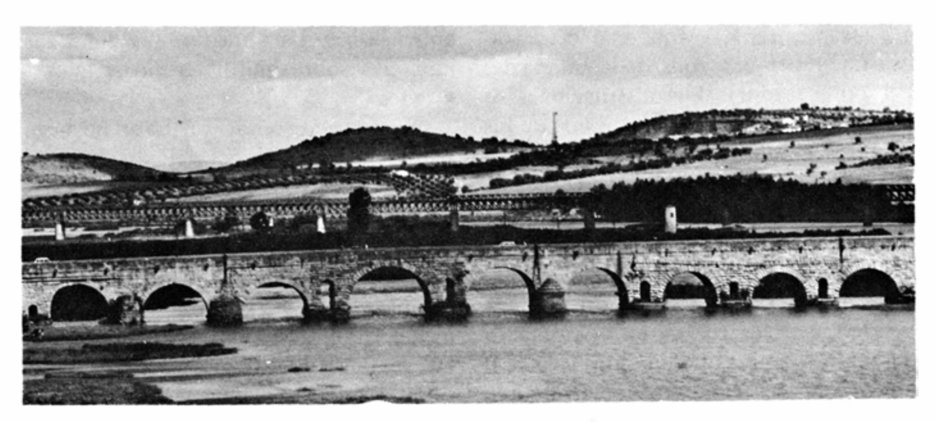
Un capítulo titulado "Software" (es decir, soporte lógico) nos lleva a lo que comúnmente se llama ayudas a la programación o soporte lógico residente, es decir, programas que, escritos y ya probados, los suministra el propio fabricante del microprocesador, o productores independientes, para facilitar la programación del microordenador. Así se pasa revista a los cargadores de programas, al ensamblador, al PL/M, al Basic, a los programas de puesta a punto (debug), a los editores, simuladores, y a los sistemas de explotación.

El libro sigue con un capítulo de métodos de prueba y verificación de microprocesadores; a éste sucede otro con una descripción somera de algunos microprocesadores (recopilación de los folletos de información proporcionados por los fabricantes de los distintos microprocesadores) y otro final con algunas aplicaciones. La obra termina con unas nociones sobre multimicroprocesadores y redes.

A nuestro entender el libro no llega nunca al fondo (por ejemplo, hubiera podido mencionar algunas virtudes y defectos de cada uno de los microprocesadores expuestos), no proporciona herramientas de diseño y resulta de difícil comprensión para el profano en electrónica o en informática. Posee, en cambio, las ventajas de dar una visión bastante completa del tema, dentro del poco espacio disponible, de ser independiente a la hora de exponer los distintos microprocesadores y estar bien traducido a pesar de que es inevitable la utilización de algún anglicismo. Otra de sus virtudes es el haberse escrito recientemente, a finales de 1975, dato muy importante en un campo de tan rápida evolución, además de haber llegado al mercado español en un momento de tan escasa producción bibliográfica sobre este tema (J.R.)

PUENTES. EJEMPLOS INTERNACIONALES, por Hans Wittfoht. Trad. Luis Asensi. Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona 1975. Hans Wittfoht cuenta y canta la construcción de puentes; desde el primer tronco que unió las orillas de un regato, hasta las más audaces fintas de hormigón pretensado que salvan hoy los ríos, valles, lagos y depresiones. Wittfoht es un constructor y un técnico de alta cualificación pero es, en este libro sobre todo, un enamorado de su oficio. Los puentes no son para él meras obras funcionales, sino el enlace entre dos cosas separadas, sean éstas montes, orillas, pueblos o, al fin y al cabo, hombres; es unión, acercamiento, ayuntamiento. Para Wittfoht, el puente es un concepto filosófico, la unidad, y una actitud estética, la belleza de formas. El título original del libro "Triumph der Spannweiten" tiene, como toda palabra compuesta alemana, una traducción variable. Viene a ser "el triunfo de lo extensible, de lo que se ensancha, de lo grandioso", pero aplicado a algo, y como en este caso ese algo es el puente, bien puede traducirse por "el triunfo de las luces", entendida la "luz" como el vano entre dos apoyos. Pero bien puede admitirse mayor amplitud semántica a esa luz de manera que sea ilustración, claridad, transparencia.

Esta luz, a la que aspira Wittfoht con su título, es asimismo la característica del libro. Hasta el tipo de imprenta escogido es claro y fácilmente legible. El estilo sencillo en traducción muy correcta soslaya todo exceso de tecnicismos, de modo que su lectura resulta asequible a todos los públicos. Ello no implica vul-



Puente romano de Mérida, sobre el Guadiana

garidad o imprecisión. Si literariamente el estilo es correcto, mucho más exacto es en la utilización de la terminología técnica. Wittfoht emplea el léxico indispensable para hacerse entender por el lector profano. En buena medida contribuye a este entendimiento el traductor, que sabe encontrar el vocablo español para expresar el concepto original sin necesidad de acudir a neologismos, ni mucho menos a barbarismos extranjerizantes. Solamente en la última parte del libro, la dedicada al pretensado, al autor se le va un poco la mano. Es en cierto modo comprensible y humano que, siendo él un especialista en esta novísima técnica de la construcción, vierta su entusiasmo en la exposición de los mil casos que avalan la eficacia, el avance y la belleza de una técnica en pleno triunfo y desarrollo; incluso que se pierda un tanto en el bosque de los procedimientos en perjuicio de la claridad expositiva del sistema.

Ciertamente el pretensado es una revolución, aún no terminada, en la utilización de los materiales para la construcción de puentes. Pero, a mi ver, no mayor de lo que fue el descubrimiento de la armadura metálica, y, por descontado, inferior a la revolución que hicieron los romanos al aplicar la bóveda etrusca al arco de medio punto.

Si la casa es la concha, el cascarón, envolvente y cobijo de esa célula social que es la familia, el puente viene a ser el lazo, la unión de las agrupaciones familiares, de los clanes, para formar la Sociedad. Los puentes son los brazos tensos, unificantes por los que corre la savia de la comunicación humana. Si la cabaña es la familia, el puente es la Sociedad. Por algo la Iglesia de Cristo en su misión ecuménica, universal, llama "Pontifex" a su sumo sacerdote. El Papa es "Pontifex maximus", el "mayor constructor de puentes". Porque él mismo es un puente, el máximo puente, entre Dios y los hombres. Este significado trascendente, esta misión de ayuntar, de comunicar entre sí tierras y hombres, es el substrato que informa el propósito de este libro ameno y luminoso como quiere el título original. Wittfoht es un ingeniero, pero es también un humanista.

No hay duda que el primer puente fue un tronco de árbol tendido entre las orillas de una garganta. Lo probable es que fuera nuestro padre Adán su primer usuario. Desde entonces hasta el Kapellenbrüke, esa maravilla que cruza el Lago de Lucerna, han pasado miles de años. Y aún hoy, para pasos de cargas livianas se construyen puentecillos y pasarelas de madera.

La madera es el material que trabajaba el hombre primitivo. Es su primer elemento para la construcción. No hay pruebas muy fehacientes de que existiesen puentes de madera en China 4000 años antes de Jesucristo, aunque quede alguna vaga noticia de ello. Lo que sí parece probable es que existieran incluso mucho antes en Mesopotamia, pues por algo dicha región es la "cuna del mundo". Allí quedan trazas de un puente mixto, pilares de ladrillo y tablero de madera, construido 600 años antes de Cristo, para cruzar el Eufrates. Se tienen noticias, ya más concretas, del paso del Bósforo por el ejército de Darío en 493 a.de J. a través de un puente de pontones de 900 m de longitud. Y con más precisión nos cuenta Herodoto el intento de Jerjes de pasar el Helesponto; para ello encargó un puente a Mandrocles de Samos quien, a punto de terminar su obra, vio cómo una tormenta se la destruía. Jerjes lo mandó decapitar. Mandrocles es el primer ingeniero de puentes que registra la historia. Y su primera víctima.

Muchas han sido éstas. Cada avance, cada novedad, ha sido un reguero de vidas humanas. Las construcciones arriesgadas han cobrado caro el progreso. Es una ley inexorable. Escaso paliativo a esta dolorosa contribución vienen a ser las leyendas y milagros que se adjudican a diversos puentes o sus circunstancias. Así el suceso acaecido durante la construcción del puente sobre el río Oja que dirigía personalmente Domingo de la Calzada. O la tradición toledana que representa la figura de una mujer con una tea en la mano, esculpida en la clave del Puente de San Martín; cuenta la leyenda que, a punto de terminarse el puente, su proyectista advirtió un error de cálculo. Al día siguiente iban a quitarse las cimbras de madera y temía que el puente se derrumbase. Aquella misma noche su mujer tomó una tea encendida y prendió fuego al armazón que lo sustentaba. El "accidente" permitió reconstruir el puente, esta vez con arreglo a los cálculos mejor hechos. Y ahí está, como maravilla arquitectónica, ese puente de San Martín para cruzar el Tajo en Toledo.

El puente de madera, como obra funcional, salvar una luz, es el sistema único desde Adán hasta los romanos. La madera es material tan perecedero que sólo se tienen noticias, pero ningún resto de estas construcciones más allá de unos pocos cientos de años. Aunque a partir de nuestra Era la piedra sustituye a la madera como elemento resistente, todavía se seguirán construyendo puentes de madera para cargas menores y accesos sencillos u ornamentales. Son por lo general puentes de poca luz y altura o esos entramados cubiertos, como el citado Kapellenbrüke o el de Gümmenen en Suiza, hoy conservados como joyas del siglo XVII.

Los propios romanos comienzan por el sistema mixto, pilares de obra y travesaño de madera, pero ya en el siglo primero emprenden las colosales obras viarias en piedra, tanto de acueductos cuanto de calzadas. La Roma imperial aplica el sistema de bóveda, heredado de sus predecesores los etruscos, al arco de medio punto como elemento resistente. El arco se forma con piedras labradas que transmiten los esfuerzos lateralmente, dovela a dovela, desde la clave que lo hace casi horizontalmente a las adjuntas, hasta la última que lo transmite vertical al estribo o pilar. El rozamiento entre sillar y sillar asegura la estabilidad. Descubrir que el rozamiento absorbe ampliamente la transmisión del esfuerzo lateral y, consecuentemente, construir el arco con el material más resistente y duradero experimentado hasta nuestros días, la piedra, es, sin duda, la mayor revolución operada en la historia de los puentes. Su eficacia, acierto y belleza aún están vivos. Cientos de puentes y acueductos lo atestiguan. Son nombres que ya forman historia: Santángelo, Mérida, Alcántara... los acueductos de Segovia y Gard...

Su vigencia funcional, no obstante, terminó con el siglo XVIII. Ya el gótico había modificado el arco de medio punto, si bien mantenía el principio de la transmisión lateral de esfuerzos a través de los sillares. En las construcciones religiosas y urbanas, "apuntaba" el arco para conseguir mayor esbeltez; en el puente, disminuía la flecha cuando así lo aconsejaba la topografía, reforzando los estribos que ahora recibían los esfuerzos oblicuos. Había nacido la ojiva –de rara aplicación en los puentes– y el arco rebajado, que sí se aplicaría, y se sigue aplicando, en la mayoría de ellos. Pero en ambos casos el principio es la transmisión lateral de esfuerzos por compresión. Hoy, en la mayoría de los puentes romanos está suspendido el paso de vehículos, ya que las grandes cargas que soportan los viales, y más aún las vibraciones derivadas de las velocidades, pondrían en peligro esos monumentos que pertenecen al acervo artístico y cultural de la humanidad. Curiosidad digna de mención es el caso de los puentes de Salamanca. Hasta hace poco más de un año, para cruzar el Tormes frente a las Catedrales sólo había dos pasos. Uno de hierro construido a principios de siglo y otro de piedra, romano, muy próximo, aguas abajo. A la entrada del de hierro, un cartel anunciaba limitación de peso, y ¡sorpréndase! la desviación de vehículos pesados ¡por el puente romano! Hoy se ha construido un puente nuevo para gran tonelaje. Pero la anécdota es muy elocuente.

El puente romano con arcos de medio punto tiene pues una vigencia de casi veinte siglos. En algunos casos, como el comercial Ponte Vecchio de Florencia, o el musical Pont d'Avignon, el arco se rebaja por imperativos de rasante, pero el material sigue siendo la piedra. Hasta que llega el hierro.

A. Darwy, en 1779, construye un puente de hierro con arco de 30 m de luz. El material es fundición quebradiza, es decir, sólo soporta esfuerzos de compresión. Técnicamente es igual que la piedra, de modo que, en principio, no supone avance alguno. Pero pronto el hierro moldeado y luego, no muchos años después, el acero, permitirán su empleo para absorber los esfuerzos de tracción. En ese momento, el puente pionero de A. Darwy da el gran salto; otra revolución semejante al arco de medio punto a comienzos de nuestra Era. A todo lo largo del XIX, las armaduras metálicas conquistan nuevas luces. Los 30 metros de A. Darwy van creciendo hasta los doscientos y trescientos. Diversos procedimientos, la celosía, la viga de alma llena, la viga de cajón o de tubo, en arco, de tramo recto... van ganando luces, rapidez, economía, esbeltez. Son los hermosos puentes metálicos que deslumbraban nuestra mirada de niño y que hoy van siendo sustituidos por su sucesor el hormigón armado. Aquellas estructuras metálicas que uno de sus más acreditados expertos, Eiffel, dejó simbolizados en la punzante torre parisiense.

El primitivo puente de lianas o cuerdas de cáñamo, probablemente utilizado ya en la Prehistoria, será el ejemplo, la norma, para el puente colgante que surge poderoso en la segunda mitad del XIX. El cable de acero en vez de la liana dará lugar a las construcciones más atrevidas y hermosas jamás alcanzadas. Desde nuestro colgante bilbaíno, hasta el Verrazano neoyorkino con sus 1298 m de luz pasando por los famosísimos de Brooklyn, Golden Gate, Estambul, etc., el puente colgante, cuyo principio es antiquísimo, cuyo elemento resistente es una cuerda tendida en catenaria que soporta con sus tirantes el tablero de paso, es hasta hoy el sistema que ha conseguido mayores luces. Todas las técnicas de arriostramiento y construcción tienden a abaratar el coste, ya sea por ahorro de material o de tiempo; pero el principio resistente es siempre el mismo. Una armadura metálica en la que unos elementos trabajan a tracción y otros a compresión.

Justamente este último concepto, que unos elementos trabajen a tracción y otros a compresión, es el fundamento y motivo del hormigón armado. La piedra había sido el elemento ideal para el trabajo a compresión, pero era absolutamente inútil para resistir esfuerzos de tracción. El hierro, el acero, es ideal para la tracción pero no muy recomendable para la compresión por su elevado coste.

Aunque ya los romanos habían utilizado una cal cuyo fraguado hidráulico daba una piedra artificial bastante dura, lo cierto es que sólo la utilizaron como argamasa y en obras al contacto del agua, las presas de los ríos, pero la piedra artificial, como material económico de construcción, no aparece hasta mediado el siglo pasado. El material obtenido por la mezcla de arena, piedra y cemento, al que llamamos hormigón, tiene la ventaja sobre la piedra natural de, por su fácil moldeo, proporcionar directamente el formato deseable eludiendo el costoso labrado de cantería; pero tiene el mismo inconveniente: su ineficacia para la tracción. Los puentes de hormigón en masa son de construcción más fácil y barata que los de piedra, pero no pueden competir con los metálicos.

En 1875, a un jardinero francés llamado Monier que había fabricado sus macetas "armadas", se le ocurrió aplicar el procedimiento construyendo un arco mixto de hormigón y acero, con sus macetas. El hormigón en las capas superiores, convexas y el acero en las inferiores, cóncavas. Al iniciarse la deformación por efecto de la carga, la capa superior de hormigón se comprime y la inferior de acero se estira. Así cada elemento, acero y hormigón, resiste los esfuerzos que convienen a su composición física. Se ha inventado el hormigón armado.

La circunstancia, descubierta después, de que ambos elementos, hierro y hormigón, tengan el mismo coeficiente de dilatación al calor, y la perfecta adherencia entre ambos elementos, hizo posible esta simbiosis o comunidad de esfuerzos, cada uno el suyo pero conjuntos, que dieron por resultado la aparición de ese material complejo llamado "hormigón armado". La primera mitad del XX sería la Era del hormigón armado; su reinado desplazará a los puentes metálicos que el tiempo, la corrosión y las cargas cada vez mayores han convertido en viejos antes de cumplir los cien años.

Mediado nuestro siglo, al terminar la segunda Guerra Mundial, la penuria de materiales, especialmente de hierro, aguza el ingenio del proyectista que se lanza a la búsqueda de nuevos procedimientos encaminados a economizar materiales férricos. Al propio tiempo, el espectacular avance tecnológico de la postguerra da paso a la obtención de altas calidades en todos los productos metalúrgicos. Hay que ahorrar hierro, cierto, pero también lo es que se alcanzan aceros de elasticidad y características resistentes jamás conocidas.

La liana o cuerda de cáñamo que dio la idea del puente colgante, vuelve a ser otra vez la célula, el punto de origen de un nuevo sistema: el hormigón pretensado. La catenaria que forma un puente colgante es el funicular, mejor dicho, el antifunicular de fuerzas a que daría lugar una carga repartida pendiente de ese cable curvado. El esfuerzo total de esa catenaria está compensado a cada lado por tirantes, torres o cualquier otro procedimiento; quiere decirse que una tensión a cada lado sostiene la carga que soporta la catenaria. Una definición simplista, quizá excesivamente simplificada, del sistema que llamamos "pretensado" sería: si esas tensiones de anclaje que soporta la catenaria se aplican previamente a un cable y se coloca éste de manera que los esfuerzos que lo deforman (técnicamente se llaman momentos flectores) sean de acción exactamente contraria a los que produciría la carga útil, se habrá conseguido el "pretensado

con estabilidad de forma" ya que al aplicar la carga real, ambos esfuerzos, el provocado por el pretensado y el derivado de la carga, se compensarán, de modo que la viga, "dejará de trabajar", recuperando su forma y distensión. Así pues, la definición simplificada sería: deformar previamente una viga para que, al recibir la carga, recupere su forma normal. Naturalmente, el sistema comporta mayores complicaciones, porque ni el tensado previo, ni las cargas, son fijos ni permanentes. La propia palabra "pretensado" debe ser tomada con pinzas, pues lo que realmente se hace es "comprimir" el hormigón, aunque la compresión se realice por medio de un cable de acero "tensado" previamente.

En la utilización industrial del sistema, lo frecuente es que se haga un "pre" tensado de la viga en fábrica (para soportar o equilibrar su propio peso), seguido de un tensado al montarla en el puente para recibir la sobrecarga fija del tablero, vial y pavimentado y, aún después, el "post" tensado correspondiente al tren de cargas móviles previstas. De ahí que pongamos en tela de juicio la licitud del vocablo "pretensado", toda vez que el "tensado" es solamente el mecanismo instrumental para conseguir una compresión previa del hormigón; el hormigón comprimido es el verdadero meollo, principio y esencia del sistema. Parece pues más exacto llamarlo, como los franceses, "hormigón precomprimido".

En principio, el sistema no aporta reducción apreciable en los costes directos; el ahorro de hierro, en peso, queda neutralizado por la más alta calidad que se exige a éste, y el del hormigón, aunque considerable, difícilmente alcanza a compensar las operaciones de tensado, que, por especializadas, resultan caras. No obstante, el sistema goza hoy de la máxima aceptación y garantía, no sólo por el incremento de seguridad que significa, toda vez que la fluencia tanto del acero cuanto del hormigón vienen a "descargar" su trabajo (el peligro de rotura de una viga está en el momento de tensarla, pero no cuando ya está "trabajando"), sino también, y sobre todo, porque viene a favorecer la aspiración del constructor de puentes: conseguir mayores luces. Aproximadamente, para una misma luz, la altura de una viga en T de hormigón pretensado tendrá un tercio de la altura que se necesitaría para la de hormigón armado normal. Así pues, la disminución del peso propio se traduce en mayor resistencia útil y, en consecuencia, en alcanzar mayores luces con las mismas dimensiones. "Más luz" pidió Goethe al morir. Más luz es la obsesión irrefrenable del constructor. (E.L.-O.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

SUPERPHÉNIX: UN REACTOR REPRODUCTOR A ESCALA INDUSTRIAL

FAST BREEDER REACTORS. Glenn T. Seaborg y Justin L. Bloom en *Scientific American*, vol. 223, n.º 5, págs. 13-21; noviembre, 1970.

THE NECESSITY OF FISSION POWER. H. A. Bethe en *Scientific American*, vol. 234, n.º 1, págs. 21-31; enero, 1976.

THE BREEDER: WHEN AND WHY. *EPRI Journal*, vol. 1, n.º 2; marzo, 1976.

ONDAS EN EL VIENTO SOLAR

SOLAR WIND STREAM EVOLUTION AT LARGE HELIOCENTRIC DISTANCES: EXPERIMENTAL DEMONSTRATION AND THE TEST OF A MODEL. J. T. Gosling. A. J. Hundhausen y S. J. Bame en *Journal of Geophysical Research*, vol. 81, n.º 13, págs. 2111-2122; mayo 1, 1976.

LOS RECEPTORES DE LOS OPIACEOS Y SUBSTANCIAS OPIACEAS ENDOGENAS

OPIATE RECEPTOR: DEMONSTRATION IN NERVOUS TISSUE. Candace B. Pert y Solomon H. Snyder en *Science*, vol. 179, n.º 4077, págs. 1011-1014; marzo 9, 1973.

PROPERTIES OF OPIATE-RECEPTOR BINDING IN RAT BRAIN. Candace B. Pert y Solomon H. Snyder en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 70, n.º 8, págs. 2243-2247; agosto, 1973.

REGIONAL DISTRIBUTION OF OPIATE RECEPTOR BINDING IN MONKEY AND HUMAN BRAIN. Michael J. Kuhar, Candace B. Pert y Solomon H. Snyder en *Nature*, vol. 245, n.º 5426, págs. 447-450; octubre 26, 1973.

OPIATE RECEPTOR MECHANISMS. Dirigido por Solomon H. Snyder y Steven Matthysse con Huda Akil, Ian Creese, Peter A. Mansky y Gavril W. Pasternak en *Neurosciences Research Program Bulletin*, vol. 13, n.º 1; febrero, 1975.

THE OPIATE RECEPTOR: A MODEL EXPLAINING STRUCTURE-ACTIVITY RELATIONSHIPS OF OPIATE AGONISTS AND ANTAGONISTS. Andrew P. Feinberg, Ian Creese y Solomon H. Snyder en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 73, n.º 11, págs. 4215-4219; noviembre, 1976.

FIJACION BIOLOGICA DE NITROGENO

SURVEY OF NITROGENASE AND ITS EPR PROPERTIES: A COMPREHENSIVE TREATISE. R. H. Burris y W. H. Orme-Johnson en *Microbial Iron Metabolism*, dirigido por J. B. Neilands. Academic Press, 1974.

NITROGEN FIXATION IN BACTERIA AND HIGHER PLANTS. R. C. Burns y R. W. F. Hardy. Springer-Verlag, 1975.

REGULATION AND GENETICS OF BACTERIAL NITROGEN FIXATION. Winston J. Brill en *Annual Review of Microbiology*, vol. 29, págs. 109-129; 1975.

LA ACUSTICA DEL CANTO

TOWARDS AN INTEGRATED PHYSIOLOGIC-ACOUSTIC THEORY OF VOCAL REGISTERS. John Large en *NATS Bulletin*, vol. 28, n.º 3, págs. 18-25, 30-36; febrero/marzo, 1972.

ARTICULATORY INTERPRETATION OF THE "SINGING FORMANT." Johan Sundberg en *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 55, n.º 4, págs. 838-844; abril, 1974.

FUNDAMENTALS OF MUSICAL ACOUSTICS. Arthur H. Benade. Oxford University Press, 1976.

LAS ROCAS MAS ANTIGUAS Y LA ACRECION DE LOS CONTINENTES

THE EARTH'S AGE AND GEOCHRONOLOGY. Derek York y Ronald M. Farquhar. Pergamon Press, 1972.

A DISCUSSION ON THE EVOLUTION OF THE PRECAMBRIAN CRUST. Organizado por J. Sutton y B. F. Windley en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, vol. 273, n.º 1235, págs. 315-581; febrero 8, 1973.

PLANET EARTH: READINGS FROM SCIENTIFIC AMERICAN. Introducciones de Frank Press y Raymond Siever. W. H. Freeman and Company, 1974.

THE EARLY HISTORY OF THE EARTH. Dirigido por Brian F. Windley. John Wiley & Sons, 1976.

PECES LUMINOSOS DESTELLANTES

BIOLUMINESCENCE. E. Newton Harvey. Academic Press Inc., 1952.

LES PETITS PEUGEOTS OF GRANDE COMORE. John E. McCosker y Michael D. Lagios en *Pacific Discovery*, vol. 28, n.º 5, págs. 1-6; septiembre-octubre, 1975.

LIGHT FOR ALL REASONS: VERSATILITY IN THE BEHAVIORAL REPERTOIRE OF THE FLASHLIGHT FISH. James G. Morin, Anne Harrington, Kenneth Nealson, Niel Krieger, Thomas O. Baldwin y J. W. Hastings en *Science*, vol. 190, n.º 4209, págs. 74-76; octubre 3, 1975.

KRYPTOPHANERON HARVEYI, A NEW ANOMALOPID FISH FROM THE EASTERN TROPICAL PACIFIC, AND THE EVOLUTION OF THE ANOMALOPIDAE. Richard H. Rosenblatt y W. Linn Montgomery en *Copeia*, n.º 3, págs. 510-515; agosto 20, 1976.

LUZ ZODIACAL

INTERPLANETARY DUST AND ZODIACAL LIGHT. H. Elsasser y H. Fechtig. Lecture Notes in Physics-48. Springer-Verlag 1975.

ZODIACAL LIGHT PHOTOPOLARIMETRY. I. Observations, Reductions, Disturbing Phenomena, Accuracy. R. Dumont y F. Sánchez, en *Astron. and Astrophys.* 38, 397-403 (1975). II. Gradients along the Ecliptic and the Phase Functions of Interplanetary Matter. Id., en *Astron & Astrophys.* 38, 405-412 (1975). III. All Sky Survey from Teide 1964-1975 with Emphasis on Off-ecliptic Features. Id., en *Astron. & Astrophys.* 51, 393-399 (1976).

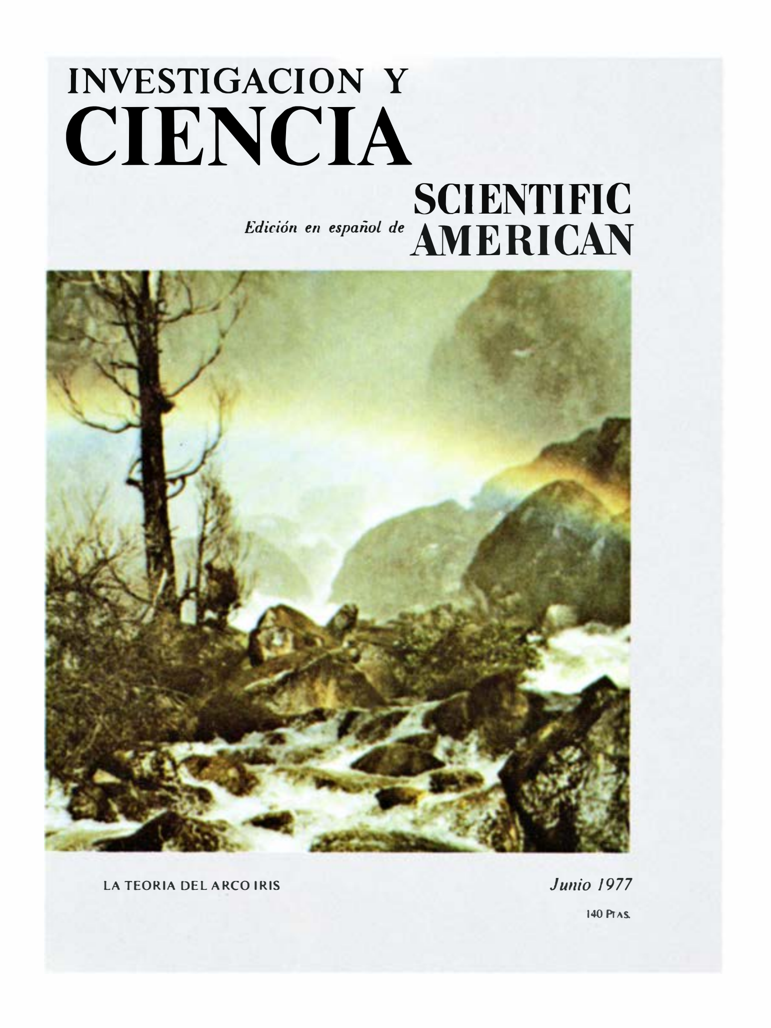
JUEGOS MATEMATICOS

THE GOLDEN SECTION, PHYLLOTAXIS, AND WYTHOFF'S GAME. H. S. M. Coxeter en *Scripta Mathematica*, vol. 19, n.os 2-3, págs. 135-143; junio-septiembre, 1953.

A FIBONACCI PROPERTY OF WYTHOFF PAIRS. Robert Silber en *The Fibonacci Quarterly*, vol. 14, n.º 4, págs. 380-384; noviembre, 1976.

WYTHOFF'S NIM AND FIBONACCI REPRESENTATIONS. Robert Silber en *The Fibonacci Quartely*, vol. 15, n.º 1, págs. 85-88; febrero, 1977.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA IMPORTACION DE GAS NATURAL LICUADO, Elisabeth Drake y Robert C. Reid

La escasez padecida en el invierno pasado ha puesto de manifiesto la creciente incertidumbre sobre un futuro suministro. La importación de gas natural licuado por barco quizá mejore esa situación, pero ¿qué riesgos conlleva?

LA COLISION ENTRE LA INDIA Y EURASIA, Peter Molnar y Paul Tapponnier

Durante los últimos 40 millones de años el subcontinente índico ha sufrido un empuje hacia el norte colisionando contra la masa continental de Eurasia. Ello ha dado lugar a los terremotos más violentos y a las más diversas formas de relieve conocidos.

EL PROBLEMA DEL INTERFERON, Derek C. Burke

Hace veinte años que se descubrió la proteína que defiende a las células de los virus. Han presentado dificultades su purificación y el conocimiento de su mecanismo de acción, pero aún promete ser útil para combatir enfermedades víricas graves.

ALGORITMOS, Donald E. Knuth

Un algoritmo es un conjunto de reglas que permiten obtener una salida específica a partir de una entrada específica. Cada paso debe estar definido tan exactamente que pueda traducirse a lenguaje de computador, y ser ejecutado por una máquina.

LA TEORIA DEL ARCO IRIS, H. Moysés Nussenzveig

¿Por qué aparecen en ciertas regiones del ciclo esos bellos arcos coloreados cuando la luz del sol se difunde por gotas de agua?

LOS ACOMPAÑANTES DE LAS ESTRELLAS DE TIPO SOLAR, Helmut A. Abt

Muchas estrellas están acompañadas por otras; ¿es posible que algunas posean planetas? Una amplia búsqueda espectrográfica de acompañantes, extendida a 123 estrellas relativamente próximas suministra la clave para la frecuencia de los sistemas planetarios.

BIOCRISTALES, Shinya Inoué y Kayo Okazaki

El desarrollo de un complicado esqueleto cristalino en el interior del embrión transparente del erizo de mar proporciona un modelo que explica la forma de los tejidos mineralizados duros tales como conchas y huesos.

EVOLUCION CROMOSOMICA DE LOS PRIMATES, José Egozcúe

Los mecanismos de especiación cromosómicos han creado barreras entre dos grupos de una misma población. En los primates, la organización del material genético muestra escasa variación a lo largo del proceso evolutivo.

